

**Institut für Flugzeugbau
der Universität Stuttgart**

Bachelorarbeit

„Holzbasierte Bodenstruktur für eine Güterkapsel für das
Fahrzeugkonzept U-Shift“

Bearbeiter

Moritz Rudlaff

Bachelorarbeit

„Holzbasierte Bodenstruktur für eine Güterkapsel für das
Fahrzeugkonzept U-Shift“

„Wood-based floor structure for a cargo capsule for the U-Shift
concept“

Erstellt von Moritz Rudlaff



Universität Stuttgart

Universität Stuttgart
Institut für Flugzeugbau • Pfaffenwaldring 31 • 70569 Stuttgart

Moritz Rudlaff
Josef-Waibel-Weg 7
70469 Stuttgart

Matr.-Nr.: 3237456

Institut für Flugzeugbau

Institutsleitung
Prof. Dr. Peter Middendorf
Prof. Dr. Po Wen Cheng
Prof. Dr. Andreas Strohmayer

Kontakt
Pfaffenwaldring 31
70569 Stuttgart
T 0711 685-62402
F 0711 685-62449

Bachelorarbeit

Holzbasierte Bodenstruktur für eine Güterkapsel für das Konzept U-Shift

Kurzbeschreibung:

Durch die zunehmenden Bestrebungen die CO₂-Emissionen von Fahrzeugen nicht nur im Betrieb, sondern auch in der Produktion zu reduzieren, gewinnen nachwachsende Rohstoffe immer größere Beachtung - auch in Fahrzeugstrukturen. Gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung entwickelt das DLR ein innovatives Fahrzeugkonzept, das sich durch eine Trennung der Antriebskomponenten und der eigentlichen Transportfunktion auszeichnet. Hierfür werden sogenannte „Drive Boards“ entwickelt die unterschiedlichen Kapseln für den Güter- oder Personentransport aufnehmen können. Neben einem innovativen Fahrzeugkonzept sollen auch innovative Werkstofflösungen entwickelt und validiert werden.

Ziel der Bachelorarbeit ist die Konzeption, Konstruktion und Vorauslegung einer Bodengruppe für eine Güterkapsel in CATIA. Neben der Erstellung eines Lastenheftes für die Bodengruppe muss ein geeignetes Holz-Hybridmaterial ausgewählt werden. Dabei kann auf bereits vorangegangenen Arbeiten aufgebaut werden. Im Baugruppenkontext der Güterkapsel soll dann die Bodengruppe konstruiert und Detailkonzepte für die Anbindung von Komponenten berücksichtigt werden. Soweit zeitlich realisierbar bilden die Darstellung der erarbeiteten Lösungen in Form eines Demonstrators und die Validierung für quasistatische Lastfälle den Abschluss der Arbeit.

Arbeitspunkte:

- Konzeption und Vorauslegung einer Bodengruppe
- Wahl eines geeigneten Holz-Hybridmaterials
- Erstellung eines Lastenheftes
- Konstruktion in CATIA
- Erstellung eines Demonstrators und Validierung für quasistatische Lastfälle

Arbeit ausgegeben am: 03.08.2020

Arbeit abgegeben am:

Betreuer: Giovanni Piazza / David Käse (DLR)
Daniel Sommer (IFB)

Stuttgart, 01.09.2020


Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Vorüberlegungen für eine holzbasierte Bodenstruktur in einer Güterkapsel des Fahrzeugkonzeptes U-Shift erschlossen und Lösungen dazu entwickelt. Zum Erreichen dieses Zieles wurden zuerst die Randbedingungen, sowie die festgelegten Normen in einem Lastenheft gesammelt. Danach wurde mit einem morphologischen Kasten und einer anschließenden Nutzwertanalyse das Bodenkonzept ausgewählt.

Die Decklage und der Boden wurden als einfache Plattenkonstruktionen festgelegt - der Kern als vergleichsweise komplexe Hexagonstruktur mit Mittelplatte. Der Kern besteht jeweils aus Furnierschichtholz.

Darauf basierend wurden vereinfachte Varianten des Kerns ohne Sperrlagen als parametrisches Modell in Catia V5 aufgebaut, simuliert und iterativ optimiert. Die Optimierung wurde nach 3 Simulationsschleifen mit Erfüllen der Anforderungen aus dem Lastenheft beendet. Zur Überprüfung wurde im Anschluss die gefundene Lösung aufwendig und genau konstruiert und simuliert. Hier stellte sich heraus, dass ein Sicherheitsfaktor von 1,5 vorab zu konservativ ist und ein Sicherheitsfaktor von 1,3 bei einer Vorauslegung reicht.

Anschließend wurden die Abschnitte der Hexagonstrukturen gefertigt und im Druckversuch auf einer Universalprüfmaschine geprüft. Dadurch konnte das entwickelte Konzept der Hexagonstruktur mit Mittelplatte validiert werden.

In einem weiteren Schritt wurde der Kern mit anderen gewichtsneutralen Lösungen verglichen, um eine Einordnung des entwickelten Konzeptes zu gewährleisten. Das Hexagonkonzept hat im Vergleich zu ähnlichen Holzlösungen eine deutlich höhere Steifigkeit. In einem direkten Vergleich zu einer ähnlichen Aluminiumbauteillösung hat das Hexagonkonzept eine niedrigere Steifigkeit, aber aufgrund der holzbasierten Bauweise wurde die Aluminiumbauteillösung nicht weiterverwendet.

Danach wurde ein Gesamtbodenkonzept ausgearbeitet, in welchem das Hexagonkonzept die tragende Struktur übernimmt.

Zuletzt wird ein Ausblick auf mögliche Verbesserungen und Optimierungen des Bodenkonzeptes gegeben.

Abstract

In this thesis, preliminary considerations and solutions for a wood-based floor structure in a goods capsule of the vehicle concept U-Shift were developed. In order to achieve this goal, boundary conditions as well as defined standards were first collected in a specification sheet. Afterwards the floor concept was derived through a morphological box and a subsequent utility value analysis.

The top layer and the bottom were defined as simple plate structures - the core as a comparatively complex hexagonal structure with a central plate. Based on this, variants of the core were constructed as a parametric model in Catia V5, simulated and iteratively optimized. The optimization was completed after 3 simulation loops when all specified conditions were met. For verification purposes, the solution found was then accurately constructed and simulated. Here it turned out that a safety factor of 1.5 is too conservative in advance and a safety factor of 1.3 is sufficient for a preliminary design. Subsequently, the sections of the hexagonal structures were manufactured and tested on a testing machine. This allowed the concept of the hexagonal structure to be validated.

In a further step, the core was compared with other weight-neutral solutions to ensure that the developed concept could be classified. The hexagon concept has a significantly higher stiffness compared to similar wood solutions. In a direct comparison with a similar aluminum component solution, the hexagon concept has a lower stiffness, but due to the wood-based design, the aluminum component solution was not used further. Afterwards, an overall floor concept was developed in which the hexagon concept takes over the load-bearing structure.

Finally, an outlook on possible improvements and optimizations of the floor concept is given.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	v
Abstract	vi
Inhaltsverzeichnis.....	vii
Nomenklatur	ix
Abbildungsverzeichnis.....	x
Tabellenverzeichnis	xii
1. Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung.....	2
2. Grundlagen zum Werkstoff Holz.....	3
2.1 Aufbau von Hölzern.....	3
2.2 Physikalische Eigenschaften	4
2.3 Feuchteabhängigkeit	4
2.4 Fügeverfahren mit Holz.....	4
2.5 Prinzip der Zugseile der Natur.....	5
2.6 Holzfurniere und Furnierschichtholz	7
3. Entwicklung einer holzbasierten Bodenstruktur	9
3.1 Konzeptfindung für die Bodenstruktur	9
3.1.1 Erstellung des Lastenheft	9
3.1.2 Erstellung und Auswertung eines morphologischen Kastens für die Konzeptfindung ...	9
3.1.3 Nutzwertanalyse der Konzepte	13
3.1.4 Auswahl einer geeigneten Holzart	15
3.2 Simulative Optimierung eines Kernes	15
3.2.1 Randbedingungen für die Optimierung des Hexagonkonzeptes	16
3.2.2 Zielsetzung der Optimierungen	17
3.2.3 Einstellungen der Simulationen.....	18
3.2.4 Erste Schleife: Optimierung in Abhängigkeit des Winkels	18
3.2.5 Zweite Schleife: Optimierung in Abhängigkeit der Wandstärke der Mittelplatte	21
3.2.6 Dritte Schleife: Optimierung in Abhängigkeit der Wandstärke des Hutprofils	25
3.2.7 Genaue FEM-Simulation der Hexagonstruktur mit Mittelplatte.....	28
3.2.8 Fazit der Simulativen Optimierung der Hexagonstruktur mit Mittelplatte.....	30
3.3 Validierung des Konzepts anhand von Versuchen	31
3.3.1 Herstellung eines Werkzeuges	31
3.3.2 Herstellung der Hexagonstrukturen.....	32

3.3.3	Fehlerquellen und Lösungen bei der Herstellung der Hexagonstrukturen	34
3.3.4	Versuche an liegenden Hexagonstrukturen	35
3.3.5	Versuche an stehenden Hexagonstrukturen	38
3.3.6	Fazit der Versuche	40
3.4	Simulativer Vergleich des Kerns zu alternativen Querbalken	41
3.4.1	Parameter der Simulationen	42
3.4.2	Simulation der Querträger	43
3.4.3	Vergleichende Bewertung der Hexagonstruktur mit Mittelplatte zu den Querbalken	44
3.5	Anbindungsmöglichkeiten des Kerns	45
3.5.1	Grundbedingungen	45
3.5.2	Konzeptfindung	45
3.5.3	Bewertung des Konzeptes	48
4.	Fazit	50
5.	Diskussion und Ausblick	51
6.	Literaturverzeichnis	I
7.	Anhang A1	II
8.	Eidesstattliche Erklärung	III

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-aided design
CNC	Computerized Numerical Control
FEM	Finite Elemente Methode
KEP	Kurier-, Express-, und Paketdienst
UPM	Universalprüfmaschine

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 – U-Shift Fahrzeugkonzept	1
Abbildung 2.1 – Laubbäume Querschnitt	3
Abbildung 2.2 – Nadelbäume Querschnitt	3
Abbildung 2.3 – Hauptrichtungen bei einem Baum	4
Abbildung 2.4 – Drucklastfall Zugseile der Natur	6
Abbildung 2.5 – Biegelastfall Zugseile der Natur	6
Abbildung 2.6 – Schublastfall Zugseile der Natur	7
Abbildung 2.7 – Endlostrockner	8
Abbildung 3.1 – Aufbau der Bodenstruktur	10
Abbildung 3.2 – Vorzeichenkonvektion des Driveboards	10
Abbildung 3.3 – v.l.n.r. „quer“; „längs“; „gesamt“	12
Abbildung 3.4 – CAD-konstruktion des Hexagonkonzeptes	15
Abbildung 3.5 – Anordnung der Querbalken	16
Abbildung 3.6 – Randbedingungen der Simulationen	17
Abbildung 3.7 – Messpunkte der Simulationen	18
Abbildung 3.8 – Gleichbleibende Parameter der ersten Optimierung	19
Abbildung 3.9 – Ergebnisse der Simulation der ersten Optimierung für Flankenwinkel 45°	19
Abbildung 3.10 – Spannungsvergleich der ersten Optimierung	21
Abbildung 3.11 – Gleichbleibende Parameter der zweiten Optimierung	22
Abbildung 3.12 – Ergebnisse der Simulation der zweiten Optimierung für den Spezialfall	22
Abbildung 3.13 – Ergebnisse der Simulation der zweiten Optimierung für eine Mittelplattenstärke von 5,0 mm	23
Abbildung 3.14 – Spannungsvergleich der zweiten Optimierung	24
Abbildung 3.15 – Gleichbleibende Parameter der dritten Optimierung	25
Abbildung 3.16 – Ergebnisse der dritten Optimierung der Wandstärke von 5,0 mm	26
Abbildung 3.17 – Spannungsvergleich der dritten Optimierung	27
Abbildung 3.18 – Ergebnisse der genauen Simulation	29
Abbildung 3.19 – CNC-Fräse	32
Abbildung 3.20 – Werkzeug des Hutprofils	32
Abbildung 3.21 – Faserorientierung	33
Abbildung 3.22 – Probekörper 1	33
Abbildung 3.23 – Probekörper 2	33
Abbildung 3.24 – Probekörper 3	33
Abbildung 3.25 – Maße der Probekörper	34
Abbildung 3.26 – Bauteil mit zu wenig Kleber	35
Abbildung 3.27 – Überstand am Rand des Bauteils	35
Abbildung 3.28 – Versuchskörper 1 in UPM	36
Abbildung 3.29 – Ergebnisse der liegenden Versuchsreihe	36
Abbildung 3.30 – Probekörper 1 mit gerissener Mittelplatte	37
Abbildung 3.31 – Probekörper 2 mit gerissener Mittelplatte	37
Abbildung 3.32 – Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe	39
Abbildung 3.33 – Gerissenes Bauteil Versuch 3	39
Abbildung 3.34 – Vergleichsquerbalken von links nach rechts: „Holzbalken“, „Holz-Doppel-T-Träger“ und „Aluminium-Doppel-T-Träger“	42
Abbildung 3.35 – Parameter der Simulation der Querträger	43
Abbildung 3.36 – Beispielhafte Ergebnisse der Simulation der Querträger	43
Abbildung 3.37 – Erstes Konzept einer Platte	46

Abbildung 3.38 – Verankerung beispielhaft dargestellt.....	47
Abbildung 3.39 – Beispielhafter Aufbau der Bodenstruktur.....	47
Abbildung 3.40 – Beispielhafter Aufbau des Kunststoffcover.....	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 – Strukturelemente des morphologischen Kastens.....	11
Tabelle 3.2 – Morphologischer Kasten.....	12
Tabelle 3.3 – Nutzwertanalyse	13
Tabelle 3.4 – Holzkennwerte.....	15
Tabelle 3.5 – Ergebnisse der ersten Versuchsreihe	20
Tabelle 3.6 – Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe	24
Tabelle 3.7 – Ergebnisse der dritten Versuchsreihe.....	26
Tabelle 3.8 – Ergebnisse der genauen Simulation	29
Tabelle 3.9 – Aufbau der einzelnen Probekörper	34
Tabelle 3.10 – Ergebnisse der Simulation der Querträger	44

1. Einleitung

1.1 Motivation

In der Automobilindustrie stehen große Veränderungen an. Die klassischen Verbrennungsmotoren werden aufgrund des zunehmenden Umweltbewusstseins sowie der zunehmenden Beschränkungen auf Abgase unattraktiver und die Elektromobilität gewinnt immer mehr an Relevanz im Mobilitätssektor. Das Interesse CO₂-Emissionen zu reduzieren, wächst zu einem immer wichtigeren Thema in der Mobilität der Zukunft. Städte versuchen über „Low-Emission-Zones“ und Fahrverbote für Verbrennungsmotoren „grüner und gesunder“ zu werden. [8],[9]

Die Elektromobilität ist aber nicht nur eine „grüne“ Alternative. Die Produktion der Batterien ist noch immer ein großes Problem moderner Elektrofahrzeuge, wenn auf die Umweltbilanz geachtet wird. [11] Trotzdem müssen speziell für die Industrie und die Beförderung von Gütern weitere Angebote in der Elektromobilität geschaffen werden.

Diese Probleme werden mit dem innovativen Fahrzeugkonzept U-Shift adressiert, welches in Städten eine alternative Form der Elektromobilität ermöglichen soll.

Bei dem Fahrzeugkonzept U-Shift werden Driveboard und Kapseln voneinander getrennt. Die Idee hinter der Trennung ist, dass der energieaufwändigste Teil des Elektrofahrzeuges, der Motor und die Batterie, im Driveboard untergebracht werden und dieser dann dauerhaft in Betrieb sein soll (siehe Abbildung 1.1). Abhängig von Tageszeit und Verkehrsaufkommen soll das Driveboard verschiedene Kapselarten aufnehmen und zum Zielort transportieren. Kapseln bzw. Kapselserien können dabei nach eigener Vorstellung gestaltet werden.

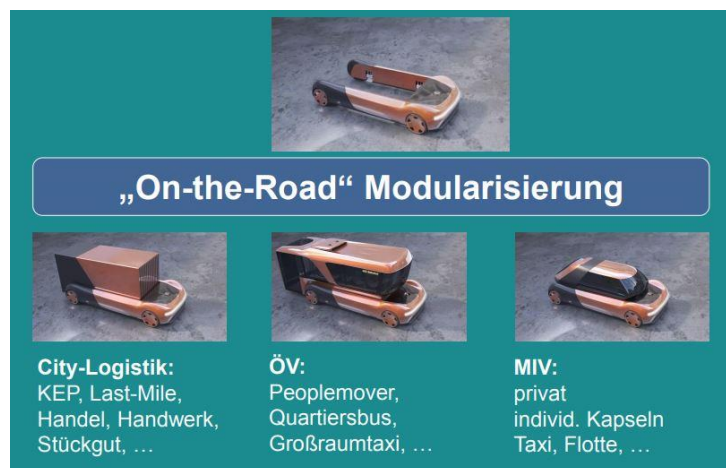


Abbildung 1.1 – U-Shift Fahrzeugkonzept [10]

Neben den Personenkapseln sollen damit auch Gütertransporte realisiert werden. Güterkapseln können auch mit speziellen Extras ausgestattet werden, zum Beispiel Kühlkapseln können eine extra

Batterie für den Kühltransport mitführen, oder KEP-Dienste optimierte Postkapseln für den Pakettransport benutzen.

Zusätzlich soll im Fahrzeugkonzept U-Shift auf die Umweltbilanz in der Produktion eingegangen werden, indem der Einsatz nachwachsender und „grüner“ Werkstoffe in den Kapseln betrachtet werden soll. Eine „grüne“ Lösung ist eines der Hauptbestandteile dieser Arbeit. Es wird im Folgenden ein Konzept für eine Bodenstruktur einer Güterkapsel umgesetzt.

Das Fahrzeugkonzept U-Shift wird dadurch als Machbarkeitsstudie eine Vorreiterrolle in der Elektromobilität einnehmen und bietet bei der Umsetzung Spielraum für innovative Ideen.

1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel der Arbeit war die Konzeption, Konstruktion und Vorauslegung einer holzbasierten, generischen Bodengruppe für eine Güterkapsel in CATIA. Neben der Erstellung eines Lastenheftes für die Bodengruppe musste ein geeignetes Holz-Hybridmaterial ausgewählt werden. Dabei konnte auf bereits vorangegangenen Arbeiten aufgebaut werden. Im Baugruppenkontext der Güterkapsel sollte eine generische Bodengruppe konstruiert und Detailkonzepte für die Anbindung von Komponenten berücksichtigt werden. Jene Detailkonzepte sollen für quasistatische Lastfälle überprüft werden.

Den Abschluss der Arbeit bildet die Validierung an einem Ausschnitt des entwickelten Kernkonzeptes sowie die Entwicklung eines ersten Konzeptes für die Bodengruppe.

2. Grundlagen zum Werkstoff Holz

Grundlage dieser Arbeit ist es ein geeignetes Holzhybridmaterial zu entwickeln, welches ausreichend hohe mechanischen Eigenschaften besitzt, um in der Bodengruppe eingesetzt zu werden. Zusätzlich sollten die ausgewählten Holzarten lokal wachsen, um eine positivere Umweltbilanz zu erfüllen. Um eine Unterteilung der Hölzer zu ermöglichen, wird im Folgenden auf verschiedene Eigenschaften von Hölzern eingegangen.

2.1 Aufbau von Hölzern

Holzarten können aufgrund ihrer physikalischen, biologischen und chemischen Eigenschaften unterschieden werden. Relevant für diese Arbeit sind die physikalischen Eigenschaften. [3]

Der mikroskopische Aufbau von Holz besteht aus einer Zelluloseschicht, in welcher die Holzfaser eingebettet ist. Die Holzfasern selbst bestehen aus sogenannten Mikrofibrillen, welche schraubenförmig in der Zellulose verlaufen. Durch sie erlangt das Holz eine sehr hohe Zugfestigkeit. In den Zwischenräumen der Holzfasern lagert sich Lignin an. Dies ist ein Verholzungsstoff, welcher die axiale Druckfestigkeit des Holzes bewirkt. [4]

Grundlegend wird zwischen Laub- und Nadelbäumen unterschieden, da sich das Holz unterschiedlich aufbaut. In Nadelbäume gibt es nur eine Zellenart, die sogenannten Tracheiden. Diese sind im Frühjahr weitlumiger gebildet, um eine bessere Leitungsfunktion zu übernehmen, und am Ende der Vegetationsperiode werden die Zellen englumiger für eine bessere Festigkeitsfunktion. Dies ist auch bekannt als Jahresringgrenze im Querschnitt eines Baumes. Es wird allgemein von Früh- und Spätholz gesprochen. Dies ist auch in Abbildung 2.1 zu sehen. [4]

In Laubbäumen treten auch Tracheiden auf, hier aber nur als Festigkeitsfunktion. Die Tracheen übernehmen in den Laubbäumen die Wasserleitungsfunktion, welche als rundliche Gefäße in dem Holz auftreten. Diese sind in Abbildung 2.2 abgebildet. [4]

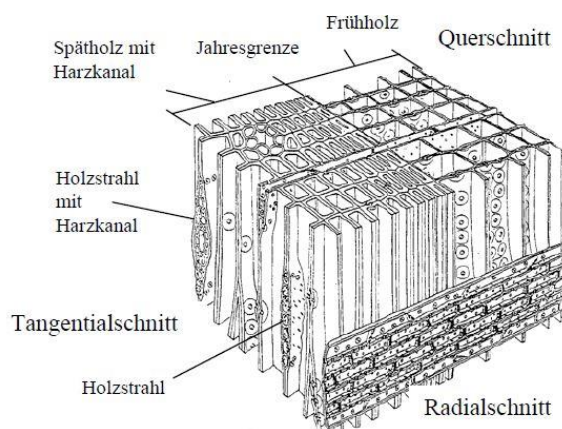


Abbildung 2.1 – Laubbäume Querschnitt [1]

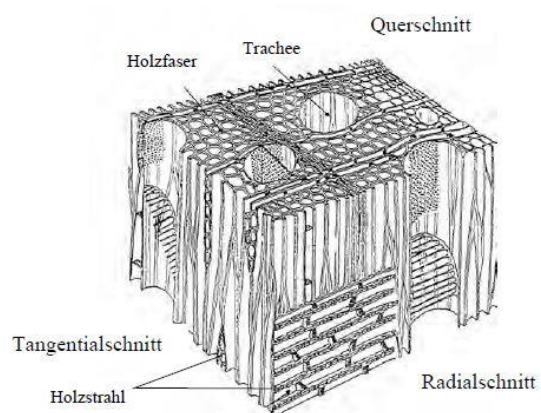


Abbildung 2.2 – Nadelbäume Querschnitt [1]

2.2 Physikalische Eigenschaften

Aufgrund des Aufbaus eines Baumstammes ergeben sich drei Hauptrichtungen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften.

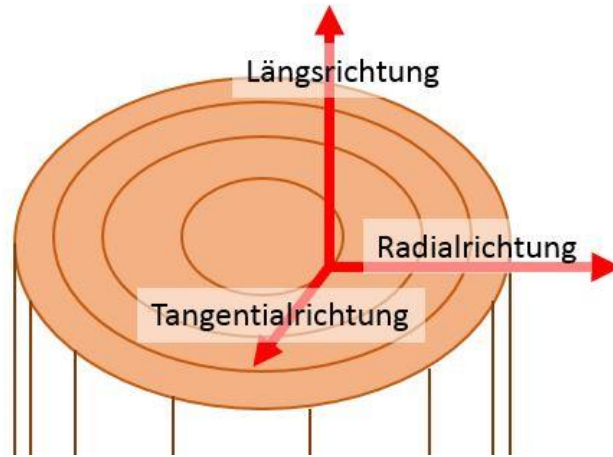


Abbildung 2.3 – Hauptrichtungen bei einem Baum

Die drei Hauptrichtungen sind die Längsrichtung (entlang der Faserrichtung), Radialrichtung und Tangentialrichtung (siehe Abbildung 2.3).

Entsprechend ist die Orientierung des Holzes in belasteten Bauteilen wichtig. Entlang der Faserrichtung weist Holz dabei die höchste Steifigkeit und Festigkeit auf.

Einer der größten Vorteile von Holz ist seine geringe Rohdichte im Verhältnis zu seiner Festigkeit. Mit steigender Rohdichte der einzelnen Hölzer nehmen die Festigkeiten im Allgemeinen zu. Die Biegsamkeit des Holzes nimmt hingegen mit steigender Rohdichte ab.

2.3 Feuchteabhängigkeit

Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff [4]. Das heißt, Holz kann Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft absorbieren und wieder an sie abgeben. Dies hat den Ursprung unter anderem an der natürlichen Funktion der Tracheiden bzw. Tracheen im Holz. Dadurch ändern sich jedoch auch die Materialeigenschaften von Holz. Holz mit einer höheren Feuchtigkeit wird elastischer gegenüber trockenerem Holz. Holz kann somit durch Erhöhung der Feuchtigkeit und zumeist auch der Temperatur biegsam gemacht werden. Dieser Effekt wird bei der Herstellung von Formholz aus Furnieren gezielt genutzt.

2.4 Füge Techniken mit Holz

Füge Techniken lassen sich in unterschiedliche Belastungen unterteilen, welche diese auf die Fügestellen auswirken. Es wird generell zwischen punktuellen und flächigen Füge Techniken

unterschieden. Als punktuelle Fügungen zählen Schrauben, Bolzen, Nägel und Dübel. Beispiele für flächige Fügetechniken sind Kleben, Schweißen und passgenaue Verbindungen.

Speziell für Holz ist es wichtig, dass die Faserstruktur des Materials beachtet wird, und Belastungen senkrecht zur Faser vermieden werden. Ansonsten können aufgrund der Faserstruktur des Holzes, bei Überschreitung der lokalen Festigkeiten, der Werkstoff aufreißen.

Dies tritt bei punktuellen Fügungen vermehrt auf, da diese bei belasteten Werkstücken an den Fügstellen einfacher aufreißen können. Generell eignen sich punktuelle Fügetechniken bei Holz daher nur, wenn diese nicht vertikal belastet werden und somit ein direktes Aufreißen an der Fügstelle verhindert werden kann.

Für Belastungen senkrecht zur Faserstruktur des Holzes eignen sich flächige Fügetechniken. Holz eignet sich besonders gut für Klebeverbindungen, da der Kleber aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft den Kleber anziehen kann und feste flächige Verbindungen schaffen kann. [5]

Bei einer flächigen Belastung des Holzes kommt es nicht zum Aufreißen in der Faserstruktur, da hierbei mehrere Fasern gleichmäßig belastet werden können als bei punktuellen Fügstellen.

Passgenaue Verbindungen beschreibt Lösungen bei denen lediglich über die Reibung und mechanische Konstruktion eine Verbindung erzeugt wird. Dies ist eine schnellere Lösung, als das Kleben, hat in der Regel aber auch eine geringere Festigkeit.

Fügstellen von Holz-Metall-Bauteilen können über Laschen oder passgenaue Verbindungen realisiert werden. Im Spezialfall der Sandwichbauweise können auch äußere Bleche mit Nieten oder Verschraubungen versehen werden. Gegenüber reinen Holz-Verbindungen bietet dies den Vorteil, dass auftretende Kräfte trotz des Einsatzes punktueller Fügetechniken flächiger auf das Holz übertragen werden.

2.5 Prinzip der Zugseile der Natur

„Die Krone des Leichtbaus ist das Zugseil.“ (S.7. [2])

In der Natur selbst werden Fasern häufig genutzt, nicht nur für klassische Zugkonstruktionen, sondern auch bei Knicklastfällen sowie bei Drucklastfällen. Nur werden in letzteren Lastenfällen trotzdem die Fasern auf Zug belastet. Dies ist häufig auf den ersten Blick nicht erkenntlich, zeigt sich aber häufig im selben Schema. Hierbei ist es entscheidend auf die Konstruktionen zu schauen, welche in der Natur benutzt werden. Generell muss zwischen den Belastungsarten unterschieden werden, welche in Zuglastfälle überführt werden. [2]

Die Umwandlung einer Druckbeanspruchung in eine Zugbeanspruchung wird in Abbildung 2.4 verdeutlicht:

Dargestellt ist eine Kreiskonstruktion mit Druckbelastungen (hier als grüne Pfeile markiert) zu sehen. In der Mitte der Kreiskonstruktion sind zwei rote Seile gespannt. Die Konvertierung von einem Drucklastfall in einen Zuglastfall erfolgt durch das Blockieren der Verformung der Kreiskonstruktion.

Die roten Seile wirken also als Zugseile der Verformung der Kreiskonstruktion entgegen und sorgen dadurch für zusätzliche Festigkeit. [2]

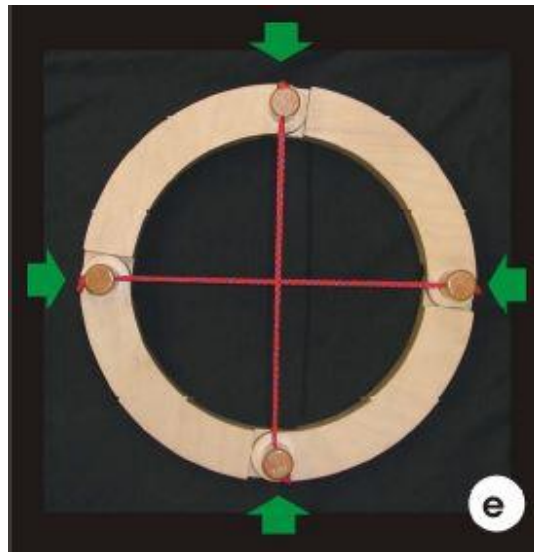


Abbildung 2.4 – Drucklastfall Zugseile der Natur [2]

Die Umformung einer Biegebeanspruchung in eine Zugbeanspruchung wird in der Abbildung 2.5 gezeigt:

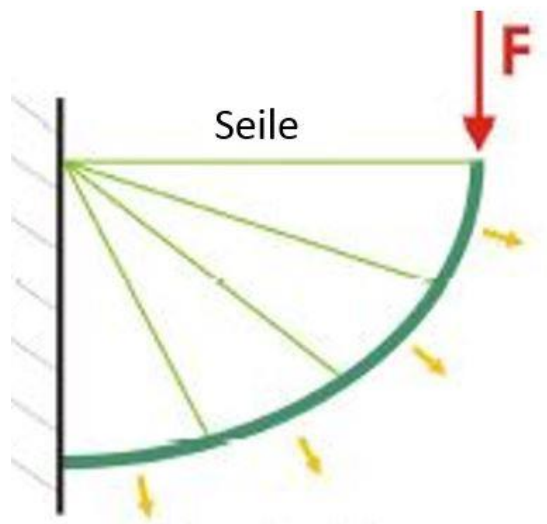


Abbildung 2.5 – Biegelastfall Zugseile der Natur [2]

In Abbildung 2.5 ist eine grüne Halbbogenkonstruktion auf Biegung beansprucht. Die hellgrünen Seile wirken dem entgegen und „wandeln“ die Biegebeanspruchung in eine Zugbeanspruchung um. Sie wirken dementsprechend als Zugseile.

Als letztes wird die Umwandlung einer Schubbeanspruchung in eine Zugbeanspruchung illustriert:

In Abbildung 2.6 ist ein roter Dorn zu sehen. Dieser wird durch einen blauen Stab, welcher durch ein gelbes Zugseil gehalten wird, nachgebildet. Die Belastung wird von rechts aufgetragen (roter Pfeil). Die auftretende Schubbelastung wird folglich über das gelbe Zugseil in eine Zugbelastung umgewandelt.

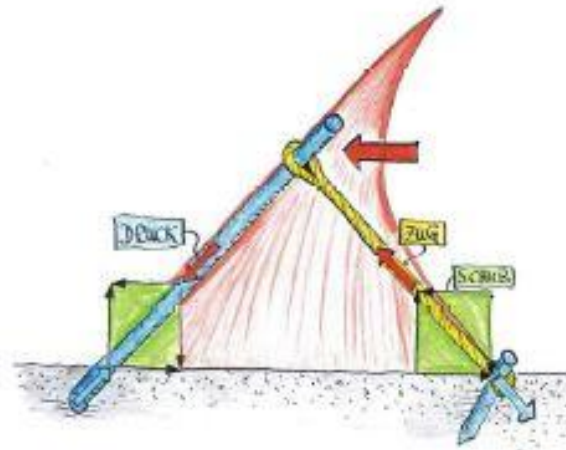


Abbildung 2.6 – Schublastfall Zugseile der Natur [2]

2.6 Holzfurniere und Furnierschichtholz

Holzfurniere werden direkt aus Baumstämmen gewonnen. Als Holzfurniere werden dünne zwischen 0,5-8 mm dicke Holzblätter bezeichnet. Grundsätzlich unterscheiden sich diese infolge ihrer Schneideart. Es gibt Sägefurniere, Schäl-furniere und Messerfurniere.

Sägefurniere werden hergestellt indem mit einer Säge die Holzblätter von einem Baumstamm abgetrennt werden. Mittlerweile kommt diese Art der Furnierherstellung nur noch bei besonders harten Holzarten sowie bei Furnieren welche ihre helle Farbe nicht verlieren sollen. [12]

Bei Schäl- und Messerfurnieren müssen die Baumstämme zuerst angefeuchtet werden. Dadurch gewinnt das Holz an Elastizität und verhindert ein direktes Absplintern der einzelnen Holzfasern (siehe Kapitel 2.3).

Schäl-furniere werden von einem rotierenden Stamm abgeschält. Dabei wird zwischen dem Rundschälen, dem Flachbogenschnitt beim Schälen und dem Radialfurnier unterschieden. Das Rundschälen funktioniert indem der Baumstamm zentrisch eingespannt wird und hierbei entstehen weniger dekorative Holzfurniere, welche daher für die Sperrholzproduktion verwendet wird.

Bei dem Flachbogenschnitt wird der Baumstamm exzentrisch rotiert, womit generell saubere Holzfurniere hergestellt werden, da die Maserung erhalten bleibt.

Das Radialfurnier kann mit dem ansitzen eines Bleistiftes verglichen werden. Hierbei werden keiskegelförmig die Furniere von den Baumstämmen abgetrennt.

Schälurniere müssen weiterverarbeitet werden, da diese durch die Herstellung sehr feucht abgeschält werden. Sie werden durch sogenannten Endlostrocknern mit anschließendem Trockenclippern zu den passenden Größen verarbeitet (Siehe Abbildung 2.7)[6].

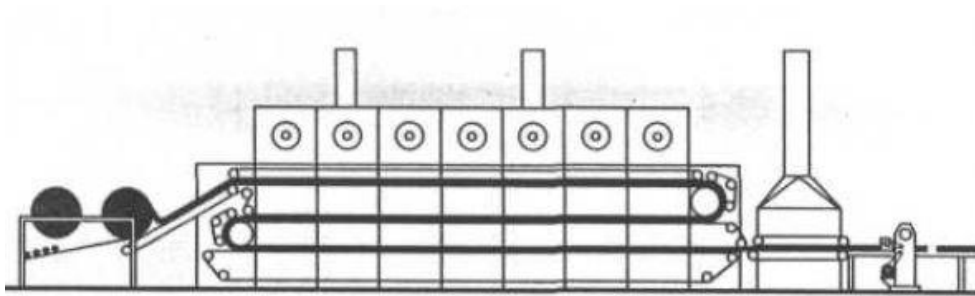


Abbildung 2.7 – Endlostrockner [6]

Messerurniere werden parallel zum Stamm mit einem Messer abgetrennt. Daher behalten diese ihre durchgängigen Fasern und werden auch als Furniere für Mehrschichtplatten benutzt.

Aus den Furnieren können Sperrholzplatten erzeugt werden. Ein Beispiel dafür ist die Multiplexplatte. Dafür werden die Furniere in einer 0°/90° Schichtlage übereinandergeschichtet. Die 90° Lage der Platte wird auch als Sperrlage bezeichnet. Durch die Sperrlage blockiert die Platte die inneren Spannungen im Holz und verhindern dadurch einen Verzug der Platte. Zusätzlich verschafft dies der Platte die gewünschte Festigkeit.[6]

3. Entwicklung einer holzbasierten Bodenstruktur

3.1 Konzeptfindung für die Bodenstruktur

Das methodische Vorgehen für die Entwicklung der holzbasierten Bodenstruktur umfasst folgende Arbeitsschritte.

Zuerst müssen die einzelnen Lastfälle und Randbedingungen definiert werden. Dies erfolgt über ein Lastenheft, welches im Anhang A1 zu finden ist.

Als nächsten Schritt werden die Ideen zur Umsetzung einer holzbasierten Bodengruppe in einem morphologischen Kasten gesammelt, mit einander kombiniert und so zu möglichen Lösungsoptionen zusammengesetzt. Zusätzlich wird ein Holzhybridmaterial ausgewählt, durch welches die Lösung realisierbar ist.

Diese Lösungsoptionen werden durch eine Nutzwertanalyse gefiltert. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse wird simulativ optimiert. Zuletzt wird das Ergebnis aus der Simulation im Versuch validiert.

3.1.1 Erstellung des Lastenheft

Bei der Erstellung des Lastenheftes wird die Bodengruppe nach einem „Blackbox“-Prinzip von nicht relevanten Teilen isoliert. Wichtige Faktoren für das Lastenheft sind die Dimensionierung des Bauraums, sowie die auftretenden mechanischen Belastungen. Weitere Bedingungen sind zudem Randbedingungen, Ladungssicherung, mechanischen Anforderungen, Miss-Use sowie Umwelteinflüsse. Zuletzt werden noch sogenannte „Nice-to-have“ Faktoren aufgelistet, welche nicht mit hoher Priorität bedacht werden, trotzdem aber einen positiven Effekt auf den Gesamterfolg des Projektes haben können.

Das Lastenheft ist im Anhang A1 zu finden und gilt über diese Arbeit hinweg auch für zukünftige Konzepte. In dieser Arbeit werden alle relevanten Daten über die Güterkapsel aus dem Lastenheft entnommen. Das Lastenheft wurde unter Berücksichtigung der Funktionen des U-Shift Projektes erstellt und alle in dieser Arbeit nicht relevanten Themen als sogenannte „Blackboxen“ angenommen. Unter einer Blackbox zählt beispielsweise der Bauraum für die Batterien. Hierfür ist in dieser Arbeit nicht die genaue Struktur der Batterien wichtig, lediglich der benötigte Bauraum. Somit wird dies als abgeschätzter Bauraum und Gewicht im Lastenheft vermerkt.

3.1.2 Erstellung und Auswertung eines morphologischen Kastens für die Konzeptfindung

Um die Bodenstruktur in sinnvolle Teilbereiche zu gliedern, wird diese in drei Schichten aufgeteilt (siehe Abbildung 3.1).

Die Decklage ist die oberste Schicht und ist der innere Boden der Kapsel, der mit Gütern beladen wird. Der Kern ist die mittlere Schicht, die einen Bauraum für Batterien, Sensorik, etc. zur Verfügung stellt. Der Boden ist die unterste Schicht, auf die die gesamte Kapsel abgestellt wird.

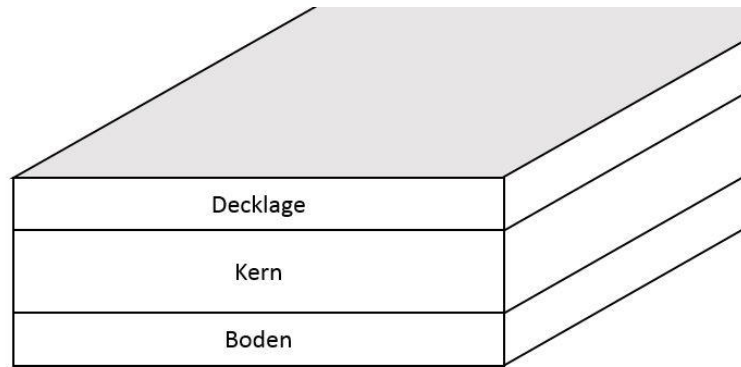


Abbildung 3.1 – Aufbau der Bodenstruktur

Grundlegende Vereinfachungen für eine Güterkapsel lassen sich aus der schnellen Be- und Entladung entnehmen, welche beispielsweise mit Europaletten erfolgt. Da der Innenraum der Güterkapsel nach aktuellem Stand auf drei Europaletten ausgelegt ist, müssen die dadurch auftretenden Belastungen lediglich auf Höhe der Auflagepunkte der Europaletten übertragen werden. Daher können einfachere Balkenkonstruktionen diese Belastung abfangen.

Aus dem Lastenheft ergeben sich weitere Überlegungen:

- Da in der Güterkapsel eine Batterie vorgesehen ist, muss die Decklage einen Zugang zum Mittelboden bieten, damit die Batterie gewartet und getauscht werden kann.
- Der Boden muss zum Schutz vor weiteren Umwelteinflüssen (Spritzschutz, stehendes Wasser, Durchschlagschutz) dienen.

Für den Rest dieser Arbeit sind die folgenden Richtungen im Kontext zum Driveboard zu beachten (siehe Abbildung 3.2):


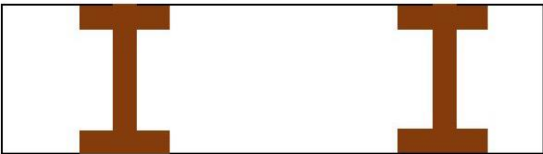

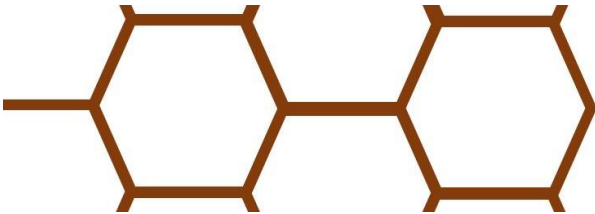
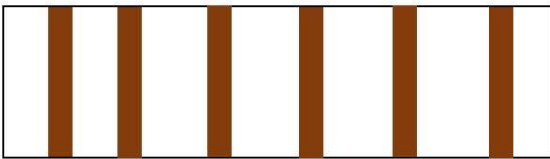
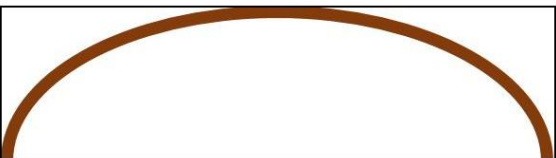


Abbildung 3.2 – Vorzeichenkonvention des Driveboards

Da die Decklage und der Boden Umwelteinflüssen, korrosiven Medien und hohen lokalen Lasten (Materialheber, Europaletten, Gitterboxen) ausgesetzt sind, bietet es sich an diese als einfache, billige und austauschbare Komponenten auszuführen. Die Bodenstruktur funktioniert somit als Verbund, wobei die Hauptlasten vom Kern an die Aufhängungen des Driveboards übertragen werden sollen. Die Decklage sowie der Boden sollen damit lediglich der Lastenübertragung auf den Kern dienen.

Damit werden für Decklage und Boden einfache Plattenkonstruktionen gewählt. Die Konzeptfindung fokussiert sich auf den Kern. Für die Konzeptfindung des Kerns bietet sich ein morphologischer Kasten an. Die einzelnen Strukturelemente des morphologischen Kastens sind die folgenden:

Tabelle 3.1 – Strukturelemente des morphologischen Kastens

Strukturname	Abbildung der Struktur
Fachwerk	<p>Decke</p>  <p>Boden</p>
Balken	<p>Decke</p>  <p>Boden</p>
Hutprofil	
Wabenstruktur	
Stützen	<p>Decke</p>  <p>Boden</p>
Bogen	<p>Decke</p>  <p>Boden</p>

Das Fachwerk und der Bogen sind als Strukturelemente in der Querrichtung (siehe Abbildung 3.2) gedacht. Beide Strukturelemente brauchen ein Höhen-Breiten-Verhältnis, damit diese ihren Zweck erfüllen. Die Stützen sowie das Fachwerk sind als stehende Strukturelemente ausgelegt. Dementsprechend ist das Bild der Wabenstruktur eine Sicht von oben auf das Strukturelement.

Das Hutprofil und der Balken sind als Längs- oder als Querbalken gedacht. Das Bild des Hutprofils beschreibt eine Seitenansicht eines Hutprofilbalkens.

Als Material werden in dem morphologischen Kasten die folgenden aufgeführt:

- Holz, da es ein nachwachsender Rohstoff ist und ein gutes Stützelement bilden kann
- Aluminium, da es im Leichtbau viel verwendet wird. Speziell Aluminiumlegierungen decken eine große Vielfalt an Optionen ab.
- Kunststoffe, da diese für Platten sowie auch für Verschleißteile aufgrund hoher Dauerfestigkeit sehr nützlich sind
- Stahl aufgrund der hohen Festigkeit

Aus den oben aufgeführten Elementen bildet sich der folgende morphologische Kasten (siehe Tabelle 3.2):

Tabelle 3.2 – Morphologischer Kasten

Material	Holz	Aluminium	Kunststoffe	Stahl		
Struktur	Fachwerk	Balken	Hutprofil	Wabenstruktur	Stützen	Bogen
Ausrichtung	längs	quer	gesamt			

Für die folgenden Konzepte gelten für die jeweiligen Silben hinter den Konzeptnamen (siehe Abbildung 3.3):

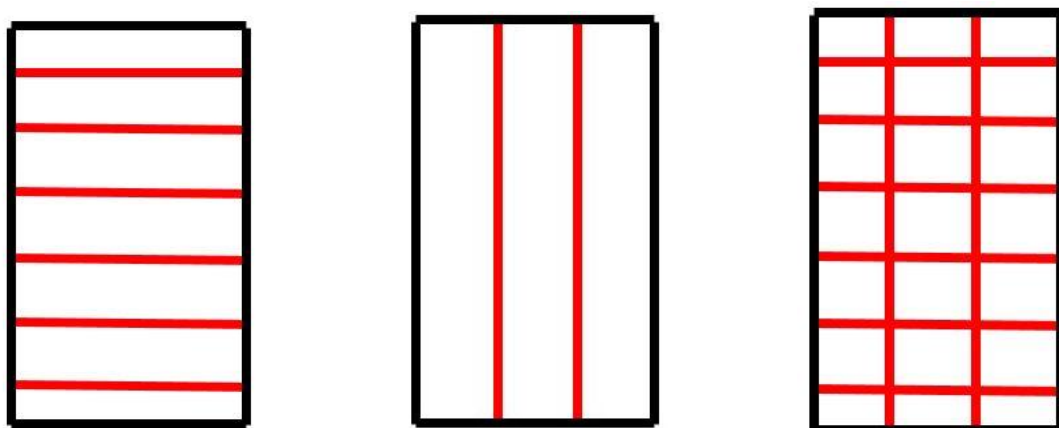


Abbildung 3.3 – v.l.n.r. „quer“; „längs“; „gesamt“

Auf Abbildung 3.3 sind drei verschiedene Varianten von Trägerstrukturen zu sehen. Der schwarze Kasten markiert jeweils den Bauraum der Bodengruppe, die roten Linien die jeweiligen Träger. Die Bodenstruktur wird von oben betrachtet.

Aus dem morphologischen Kasten können die folgenden Konzepte abgeleitet werden, die Namen setzen sich aus der Tabelle 3.1 und der Abbildung 3.2 zusammen:

- Holz-Fachwerk-quer
- Holz-Hutprofil-längs
- Holz-Hutprofil-quer
- Holz-Wabenstruktur-gesamt
- Aluminium-Balken-quer
- Aluminium-Balken-gesamt
- Aluminium-Bogen-quer

Es können noch weitere Möglichkeiten aus dem morphologischen Kasten abgeleitet werden. Kunststoffe werden jedoch aus umwelttechnischen Gründen ausgelassen, Stähle aus gewichtstechnischen Gründen.

3.1.3 Nutzwertanalyse der Konzepte

Damit aus den Konzepten ein Ergebnis gezogen werden kann, werden diese in einer Nutzwertanalyse bewertet. Es wird nach Umweltbilanz, Umsetzbarkeit und Innovativität bewertet. Die Umweltbilanz bewertet nach Auswahl des Werkstoffes. Für die Umsetzbarkeit zählen Faktoren wie die Komplexität und der Fertigungsaufwand mit in die Bewertung. Die Innovativität beschreibt wie Kreativ die Idee ist und ob die Idee attraktiv für eine neue Erkenntnis ist. Mit dieser Kategorie sollen neue Ideen bevorzugt werden. Für jeder Kategorie gibt es maximal 1 Punkt.

Die Konzepte werden nach den folgenden Eigenschaften mit jeweiliger Gewichtung bewertet:

- Umweltbilanz (Gewichtung 0,2)
- Umsetzbarkeit (Gewichtung 0,4)
- Innovativität (Gewichtung 0,4)

Tabelle 3.3 – Nutzwertanalyse

Konzept	Umweltbilanz		Umsetzbarkeit		Innovativität		Gesamt-bilanz
	Punkte	Gewichtet	Punkte	Gewichtet	Punkte	Gewichtet	
Holz-Fachwerk-quer	1	0,2	0,1	0,04	0,8	0,32	0,56
Holz-Hutprofil-längs	1	0,2	0,4	0,16	0,8	0,36	0,68
Holz-Hutprofil-quer	1	0,2	0,5	0,2	0,8	0,36	0,72
Holz-Wabenstruktur-gesamt	1	0,2	0,3	0,16	0,8	0,32	0,64
Aluminium-Balken-quer	0	0	1	0,4	0,1	0,04	0,44
Aluminium-Balken-gesamt	0	0	0,8	0,32	0,1	0,08	0,36
Aluminium-Bogen-quer	0	0	0,1	0,16	0,8	0,28	0,36

Für die Umweltbilanz wird Holz der Höchstwert und Aluminium der niedrigste Wert zugewiesen.

Die Umsetzbarkeit setzt sich wie folgt zusammen:

- Aluminium-Balken-quer kriegt die Maximalpunktzahl, da mit einem Aluminiumquerträger auch die Anbindungspunkte einfach zu realisieren sind. Zudem sind Aluminiumträger als Standardbahnen bereits auf dem Markt zu finden.
- Aluminium-Balken-gesamt ist schwieriger umzusetzen als die Querträger Version, da in dieser Version auch die Anbindungspunkte zwischen den einzelnen Trägern realisiert werden müssen.
- Holz-Hutprofil-quer ist ähnlich von der Umsetzbarkeit wie der Aluminium-Balken-quer, hierbei sind die Anbindungspunkte schwieriger, da das Bauteil aus Holz aufgebaut ist, sowie auch das Bauen eines Hutprofils.
- Holz-Hutprofil längs ist etwas schwieriger umsetzbar als der Querträger, da die Anbindungspunkte nicht direkt an das Driveboard gemacht werden können.
- Holz-Wabenstruktur-gesamt ist schwierig umzusetzen, da zum einen die Waben gebaut werden müssen (aus Hutprofilen z.B.), zum anderen aber auch diese sinnvoll angeordnet und an den Rändern befestigt werden müssen
- Für den Aluminium-Bogen-quer und das Holz-Fachwerk-quer ist die Höhe des Kerns zu niedrig, weshalb diese sehr schwierig ausulegen sind

Die Innovativität der einzelnen Konzepte setzt sich wie folgt zusammen:

- Die Hutprofile, die Wabenstruktur, der Bogen und das Fachwerk sind in Böden schwieriger umzusetzen, aber auch kreativer gedacht. Daher kriegen diese eine hohe Bewertung in dieser Kategorie
- Die reinen Balkenstrukturen sind nicht kreativ, kriegen deshalb eine niedrige Bewertung.

Die Holz-Hutprofil-quer Konstruktion hat den größten Wert in der Nutzwertanalyse erzielt.

Um den Werkstoff Holz am besten zu nutzen, wird eine Konstruktion umgesetzt, welche auftretende Drucklasten in Zugkräfte wandelt (siehe Abbildung 2.4).

Damit eine ähnliche Form wie in Abbildung 2.4 erreicht werden kann, werden zwei Hutprofile aneinandergesetzt. Das Zugseil wird durch eine dünne Holzplatte ersetzt. Aufgrund der Faserstruktur des Holzes eignet sich dieser Werkstoff vor allem für eine Zugbelastung in Faserrichtung und kann somit als Zugseil fungieren.

Durch eine Druckbelastung auf das obere Hutprofil probiert das Hutprofil dies auszugleichen indem es die Ecken auseinanderschiebt. Die Ecken sind durch das Zugseil in Form einer Holzplatte fixiert, welches dadurch auf Zug belastet wird.

Damit ergibt sich das in Abbildung 3.4 dargestellte Hexagonkonzept.

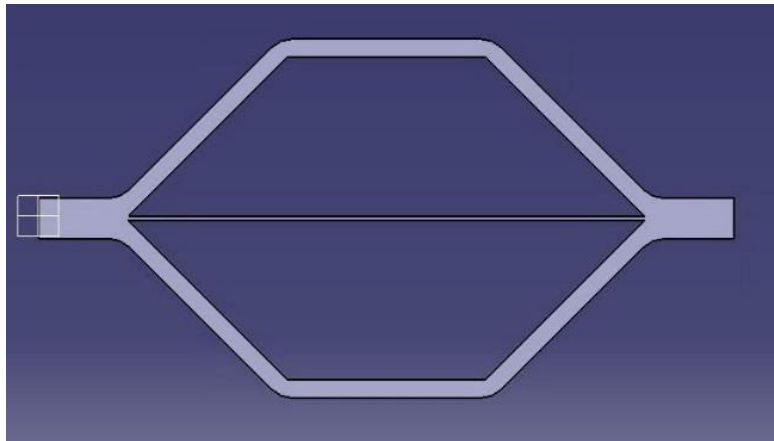


Abbildung 3.4 – CAD-konstruktion des Hexagonkonzeptes

3.1.4 Auswahl einer geeigneten Holzart

Es werden Randbedingungen aufgestellt, um für das Hexagonkonzept eine geeignete Holzart zu finden. Damit die Idee der Zugseile richtig umgesetzt werden kann, benötigt das Hexagonkonzept die Holzfasern der einzelnen Komponenten in festgelegte Richtungen geordnet haben. Dies lässt sich durch Holzfurniere realisieren, da durch Holzfurniere die einzelnen Schichten nach ihrer Faserorientierung gelegt werden können.

Da das Projekt zusätzlich eine gute Umweltbilanz erzielen soll, sollten lokale Holzsorten verwendet werden. In Deutschland sind die drei häufigsten Baumarten die Fichte, die Kiefer und die Buche.

Tabelle 3.4 – Holzkennwerte

Holzname	Rohdichte [g/cm^3]				Zugfestigkeit [MPa]	
	darrtrocken		lufttrocken			
Fichte	0,40	0,43	0,43	0,47	80	90
Radiata-Kiefer	0,37	0,55	0,40	0,59	65	80
Schwarzkiefer	0,56	0,56	0,60	0,60	76	95
Seekiefer	0,45	0,55	0,48	0,60	72	86
Buche (Rotbuche)	0,64	0,72	0,7	0,79	100	135

Buchen haben die höchste Rohdichte und Zugfestigkeit der benannten Holzarten. Daher ist Buche auch in großen Mengen Verfügbar. [10]

Buchenholzfurniere sind in der Holzverarbeitenden Industrie weit verbreitet und daher gut verfügbar. Daher werden alle weiteren Bauteile in dieser Arbeit mit Buchenholz berechnet, simuliert und hergestellt.

3.2 Simulative Optimierung eines Kernes

Nach Auswahl der Holzart Buche sowie nach Festlegung des Hexagonkonzeptes werden erste Bauteile mit der CAD Software CATIA V5 konstruiert und simuliert.

CAD ist die Abkürzung für „Computer-aided design“. Catia V5 ist eine Software, die es ermöglicht Konstruktionen virtuell in einer 3D-Modellierungsumgebung abzubilden und wird in dieser Arbeit als einziges CAD-Tool verwendet.

Mit CATIA V5 kann eine FEM-Simulation aus konstruierten Bauteilen erzeugt werden. FEM ist eine Abkürzung für Finite-Elemente-Methoden. Die FEM-Simulation ermöglicht es dabei, Bauteile auf Belastungen zu prüfen. Damit werden direkt Stärken und Schwächen verschiedener Hexagonkonstruktionen aufgezeigt und Möglichkeiten der Verbesserung sichtbar.

In der folgenden Optimierung wird die Hexagonstruktur mit Mittelplatte iterativ verbessert. Damit erfolgt in mehreren Schleifen eine Anpassung der Geometrie, welche dann jeweils simuliert und bewertet wird, bis die gesetzte Zielsetzung der Optimierung erreicht wurde (siehe Kapitel 3.2.2).

3.2.1 Randbedingungen für die Optimierung des Hexagonkonzeptes

Damit aus den Simulationen einzelner Varianten vergleichbare Ergebnisse berechnet werden können, müssen Randbedingungen festgelegt werden. Zudem ist die Maximalbelastung entscheidend mit welcher die Hexagonstrukturen belastet werden.

Das Hexagonkonzept kann in zwei verschiedenen Konzepten in die Bodenstruktur eingebaut werden, als Längsträger und als Querträger. Hierzu sind zwei Varianten in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt. Das rote Rechteck stellt jeweils die Position einer Europalette dar.

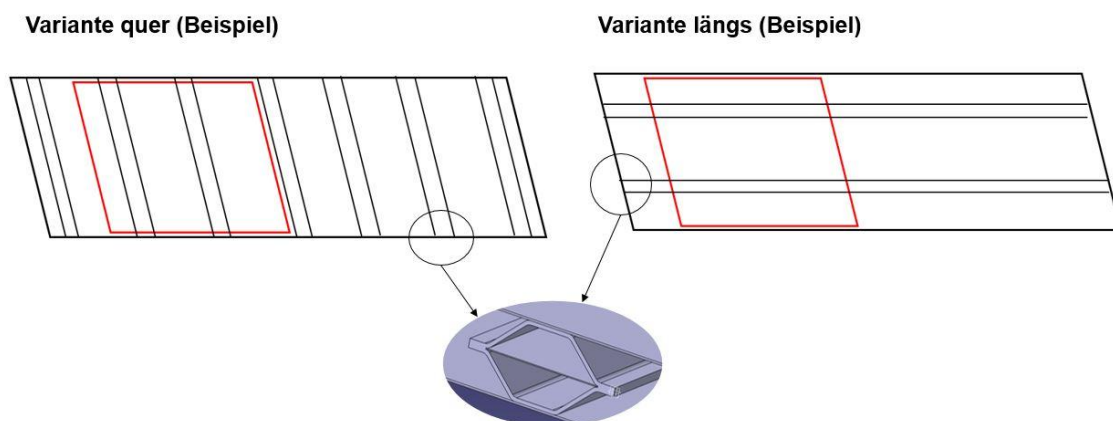


Abbildung 3.5 – Anordnung der Querbalken

Allgemein passen bis zu drei Europaletten in die Cargokapsel. Das maximale Gewicht einer Europalette ist hierbei auf 1250 kg beschränkt. Das maximale Transportgewicht der Cargokapsel beträgt 1250 kg. Somit kann eine Europalette mit Maximalgewicht oder bis zu 3 Paletten mit einem Gewicht in Summe von 1250 kg transportiert werden.

Das Worst-Case-Szenario ergibt sich, wenn die Bodenstruktur in der Variante längs (siehe Abbildung 3.5) aufgrund schlechter Ladungsverteilung einseitig von nur einer Palette belastet wird. Dies resultiert mit der Maximalbelastung aus dem Lastenheft von 1250 kg pro Palette in einer Belastung von 12.260 N.

Durch eine Auslegung auf die Fahrt muss die 3G-Senke berücksichtigt werden. Die 3G-Senke beschreibt die größte in einer Fahrt anzunehmende Belastung, die ein bewegter Körper erfährt. Durch die 3G-Senke erhöht sich die erforderte maximale Belastung somit auf das dreifache, also auf 36.780 N.

Als Vereinfachung wird in der Simulation lediglich eine Breite von 120 mm betrachtet. In der „Variante längs“ (siehe Abbildung 3.5) werden die drei Europaletten eingesetzt. Jede Europalette kann auf ihrer kompletten Breite von 800 mm belastet werden.

Dies resultiert in einer Belastung von 5.520 N ($120 \text{ mm} / 800 \text{ mm} * 36.780 \text{ N}$) auf den simulierten Bereich der Hexagonstrukturen.

Alle Hexagonstrukturen werden somit mit den in der Abbildung 3.6 gezeigten Bedingungen simuliert. Eine konstante Last von 5.520 N in negativer z-Richtung verteilt auf die oberer Fläche, sowie eine feste Einspannung an der Unterseite des Bauteiles.

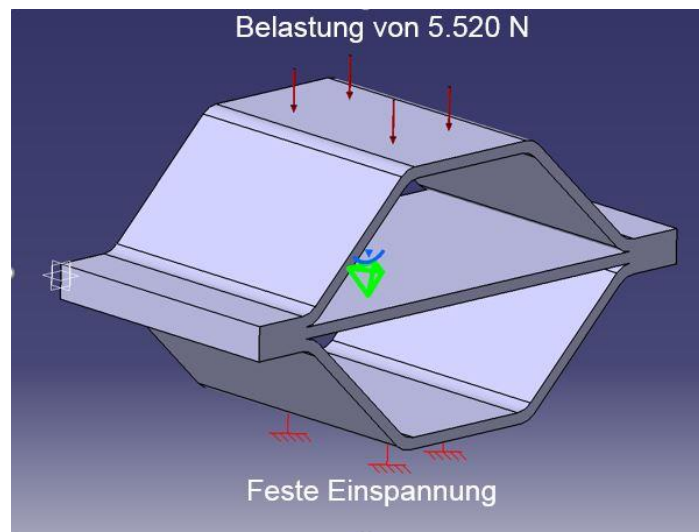


Abbildung 3.6 – Randbedingungen der Simulationen

3.2.2 Zielsetzung der Optimierungen

Damit festgestellt werden kann, welche Belastungen innerhalb des festgelegten Rahmens liegen, müssen die maximal mögliche Belastung definiert werden.

Da im Optimalfall die höchste Belastung eine Zug Belastung sein sollte, wird hierfür der maximal mögliche Betrag errechnet.

Aus den holzspezifischen Kennwerten aus Tabelle 3.4 kann als maximal mögliche Zugspannung von Buche der Bereich von 100-135 MPa festgelegt werden. Der untere Wert wird als konservative Annahme für weitere Berechnungen verwendet - daher 100 MPa als maximale Zugspannung.

Damit in der Konstruktion zeitliche Veränderungen berücksichtigt werden, müssen zudem folgende Werte miteinbezogen werden:

- Durch Beachtung der Holzalterung wird die zul. Spannung auf 80 % reduziert (→ 80 MPa)
- Durch Betrachtung der Dauerfestigkeit erneut auf 80 % reduziert (→ 64 MPa).

- Sicherheitsfaktor von 1,5 für die getroffene Vereinfachung, dass Querlagen vorerst nicht explizit betrachtet werden → zul. Spannung für die ersten Simulationen 42,67 MPa.

3.2.3 Einstellungen der Simulationen

Für die Simulation selbst wird in CATIA ein parabolisches FE-Netz generiert mit 5,0 mm Abstand zu den jeweiligen Knoten. Damit die Rechenzeit reduziert wird, wird ein parabolisches FE-Netz benutzt. Ein parabolisches FE-Netz reduziert den Abstand zwischen den Knoten in Bereichen, in welchen es auf zu große Ungenauigkeiten stößt (Beispiele hierfür sind Kanten und Übergangsbereiche).

Als maximaler globaler Fehlergrad werden 5 % festgesetzt. Dies ermöglicht trotz des groben FE-Netzes von 5,0 mm Knotenabstand z.B. eine Mittelschicht mit einer Stärke unter 5,0 mm genau zu simulieren. Eine genauere Simulation würde aufgrund der Quantität der Simulationsvarianten einen zu großen Zeitaufwand darstellen.

Als Ergebnisse der Simulationen werden die Translationen sowie die maximalen Spannungen in bestimmten Punkten gemessen. Die Translation wird als vertikale Verschiebung in der Decke sowie als horizontale Verschiebung in der Mittelplatte gemessen (siehe rote Pfeile in Abbildung 3.7). Die maximale Spannung wird in der Decke, der Flanke sowie in der Mittelplatte gemessen (siehe grüne Pfeile in Abbildung 3.7).

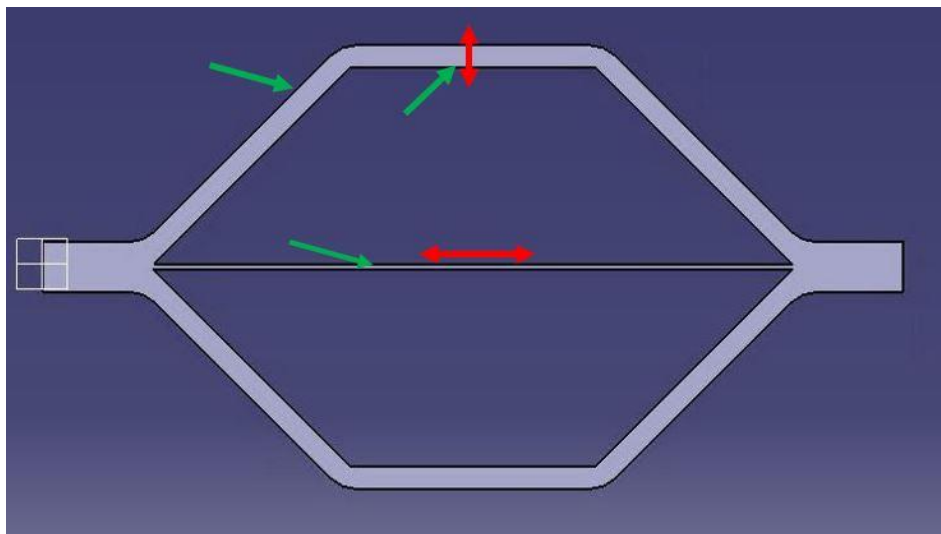


Abbildung 3.7 – Messpunkte der Simulationen

3.2.4 Erste Schleife: Optimierung in Abhängigkeit des Winkels

In der ersten Optimierungsschleife der Hexagonstruktur mit Mittelplatte wird nach dem optimalen Flankenwinkel zwischen der Mittelplatte und Hutstruktur gesucht – also nach der optimalen Steigung der Flanken. Der zu optimierende Flankenwinkel spannt sich entsprechend von der Mittelplatte zu den Flanken der Hutstruktur und wird nacheinander in vier verschiedenen Variationen simuliert, in 30°, 45°, 60° und in 80°. In dieser Optimierung der Hexagonstruktur mit Mittelplatte bleiben die in Abbildung 3.8 grün markierten Parameter gleich.

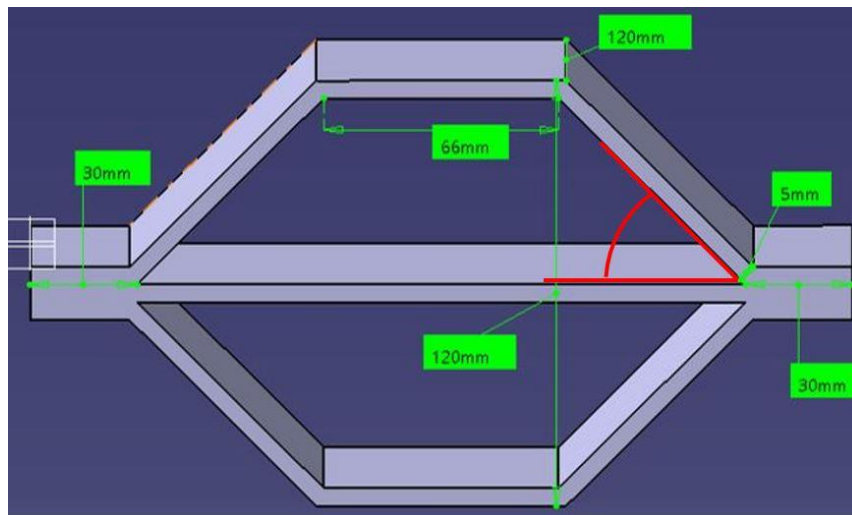


Abbildung 3.8 – Gleichbleibende Parameter der ersten Optimierung

Somit ändern sich in dieser Simulation der Flankenwinkel, die Länge der Mittelplatte und dadurch auch die Gesamtbreite. Der veränderbare Flankenwinkel ist in der Abbildung 3.9 mit rot markiert.

Zwei Ergebnisbilder der Simulation sind beispielhaft in Abbildung 3.9 zu sehen.

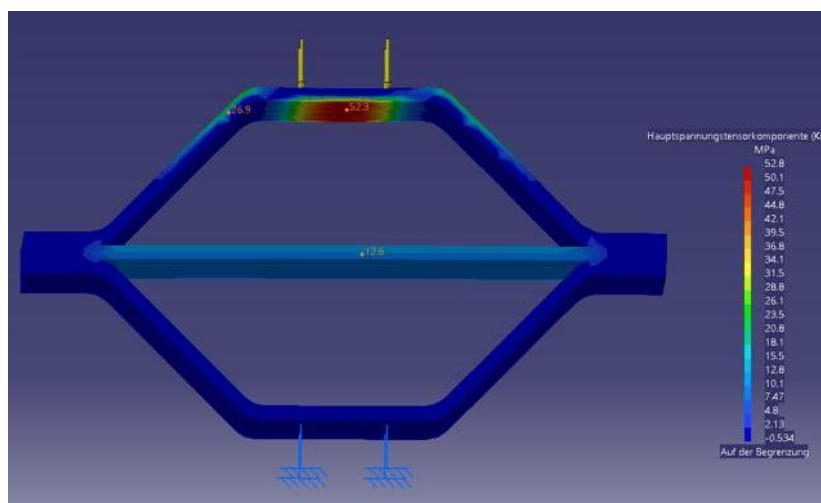
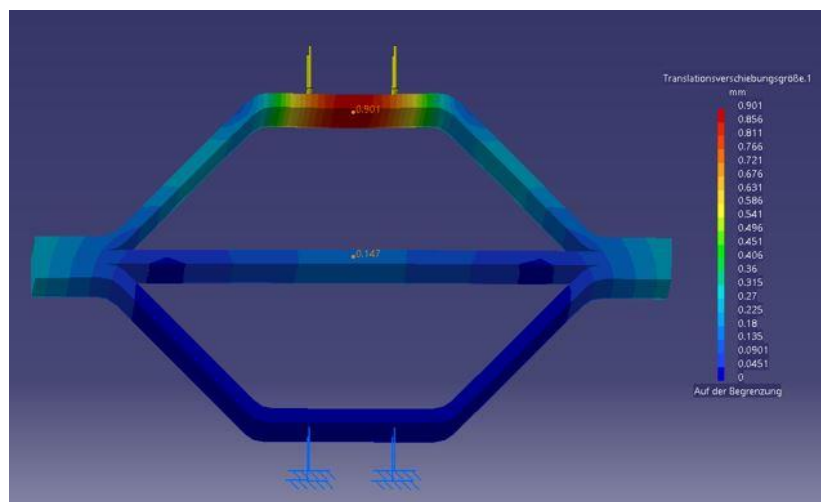


Abbildung 3.9 – Ergebnisse der Simulation der ersten Optimierung für Flankenwinkel 45°

In Abbildung 3.9 stellt das obere Bild die Translationsverschiebungen dar. Das untere Bild stellt die Spannungen dar. Je wärmer die Farbe in den Bildern ist, desto größer ist an dieser Stelle die jeweilige Translation bzw. die Spannung.

Diese Darstellungen werden analog für die nachfolgenden Optimierungsvarianten verwendet.

Aus den Ergebnissen der Simulation wurden die maximal Spannungswerte an der oberen Platte des Hutprofils, an der Flanke des Hutprofils, sowie an der Mittelplatte entnommen. Für die Maximalwerte der Translation wurden die vertikale Translation an der oberen Platte des Hutprofils sowie die horizontale Translation an der Mittelplatte entnommen. (siehe Abbildung 3.7).

Tabelle 3.5 – Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

Flankenwinkel	Spez. Gewicht	Translation oben	Translation mittig	Max. Spannung oben	Max. Spannung mittig	Max. Spannung Flanke
30°	3,611 kg/m	1,570 mm	0,301 mm	58,0 MPa	18,6 MPa	17,9 MPa
45°	2,874 kg/m	0,901 mm	0,146 mm	52,3 MPa	12,6 MPa	26,9 MPa
60°	2,512 kg/m	0,711 mm	0,113 mm	51,8 MPa	9,50 MPa	31,4 MPa
80°	2,248 kg/m	0,571 mm	0,056 mm	46,3 MPa	7,05 MPa	34,4 MPa

Wie erwartet nimmt das spezifische Gewicht mit höheren Flankenwinkeln ab. Dies liegt an einer kleiner werdenden Gesamtbreite, wodurch das Bauteil weniger Querschnittsfläche hat.

Die Ergebnisse dieser Simulation zeigen, dass mit steigendem Flankenwinkel die Spannungen im oberen Bereich sowie der Mitte sinken, während sie aber an den Flanken steigen. Zusätzlich nimmt die Translation bei größerem Flankenwinkel deutlich ab.

Dies kann an mehreren Faktoren liegen, einer der wahrscheinlichsten ist das zum einen die Mittelplatte noch zu dick ist, und somit die Steifigkeit die Umwandlung von Druck in Zugkräfte verhindert. Durch die erhöhte Steifigkeit können die Hauptlasten nicht in eine Zugbelastung in der Mittelplatte umgewandelt werden. Die Hauptlast wird dementsprechend in der Decke und den Flanken abgebaut. Die maximale Spannung ist für alle vier Fälle noch zu hoch und muss daher weiter optimiert werden. Zusätzlich ist die maximale Spannung oben und an der Flanke zu hoch. Die gewünschte Zugbelastung in der Mittelplatte ist für alle Simulationen noch zu niedrig.

In der Abbildung 3.10 sind die Spannungen im Verhältnis zueinander gesetzt. „Oben“ beschreibt die jeweilige Spannung oben im Bauteil, „Flanke“ die Flankenspannung und „Mitte“ die Spannung an der Mittelplatte. Der Graph „Summe“ zeigt die Addition der beiden Graphen „Oben/Mitte“ und „Oben/Flanke“. Durch diesen Graphen lässt sich eine bessere Gesamtabschätzung tätigen.

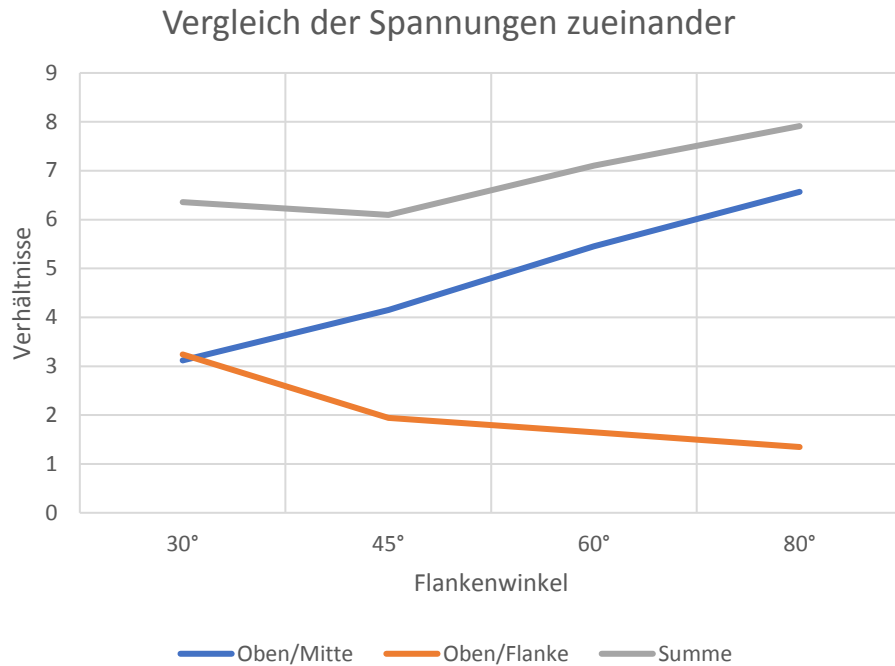


Abbildung 3.10 – Spannungsvergleich der ersten Optimierung

Für eine bessere Optimierung müssen beide Verhältnisse so niedrig wie möglich gehalten werden, und trotzdem die jeweiligen Absolutwerte unter den geforderten 42,67 MPa als maximal zulässige Spannung gehalten werden.

Das Verhältnis von Spannung oben zur Flankenspannung sollte dabei bestenfalls auf 1 reduziert werden. Dadurch fällt dieselbe Spannung an beiden Bauteilabschnitten an, wodurch die Spannung am besten verteilt ist.

Das Verhältnis von Spannung oben zur Mittelspannung sollte bestenfalls unter 1 liegen. Wenn das Verhältnis auf unter 1 sinkt, wird die meiste Spannung in Zugspannung umgewandelt. Dadurch wird die hohe Zugspannungsbelastbarkeit des Holzes bestmöglich ausgenutzt.

Der 45° Flankenwinkel hat das beste geforderte Verhältnis und wird daher für alle weiteren Hexagonstrukturen benutzt. Da das Verhältnis der oberen Spannung zur Mittelspannung in allen Fällen deutlich zu hoch ist, wird in einem nächsten Schritt die Stärke der Mittelplatte korrigiert, damit diese mehr Kräfte als Zugbelastung aufnehmen kann.

3.2.5 Zweite Schleife: Optimierung in Abhängigkeit der Wandstärke der Mittelplatte

In der zweiten Optimierung der Hexagonstruktur wird nach der optimalen Stärke der Mittelplatte gesucht.

In dieser Optimierung der Hexagonstruktur mit variabler Mittelplattenstärke bleiben die in Abbildung 3.11 mit grün markiertem Parameter gleich, der rote Pfeil zeigt die sich ändernde Mittelplattenstärke:

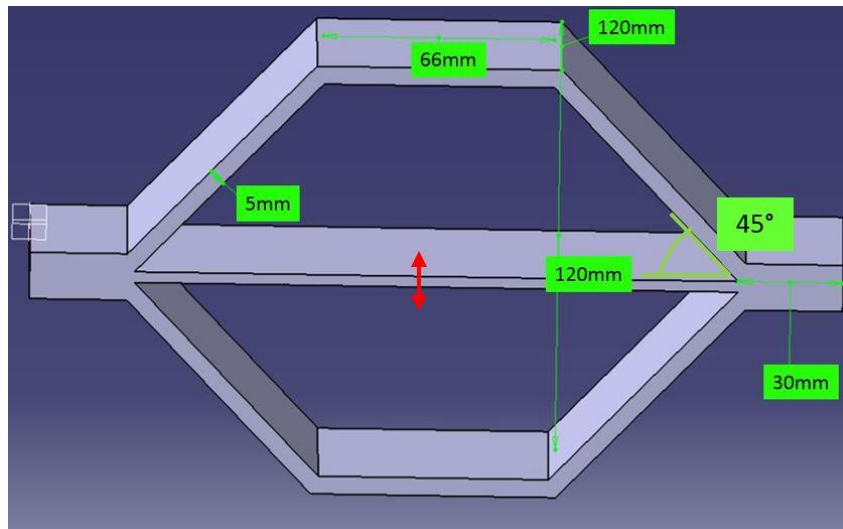


Abbildung 3.11 – Gleichbleibende Parameter der zweiten Optimierung

In dieser Optimierung werden fünf verschiedene Variationen der Mittelplatte simuliert (0,0 mm; 1,5 mm, 2,1 mm; 3,0 mm und 5,0 mm). Wobei 0,0 mm der Spezialfall ohne Mittelplatte ist. Die verschiedenen Stärken kommen aus der Schichtung der möglichen Furnierlagen. Gängige Furniere beginnen ab einer Stärke von 0,5 mm. Da Holzfurniere beim Laminieren eine Sperrlage benötigen und die Mittelplatte symmetrisch sein muss, braucht es mindestens drei Schichten an Holzfurnieren für die Mittelplatte.

Daher ergibt sich die kleinste Stärke als 3 x 0,5 mm und somit 1,5 mm. Weitere gängige Größen sind 0,7 mm und 1,0 mm.

Für den Spezialfall ohne Mittelplatte ergibt sich folgendes Ergebnisbild:

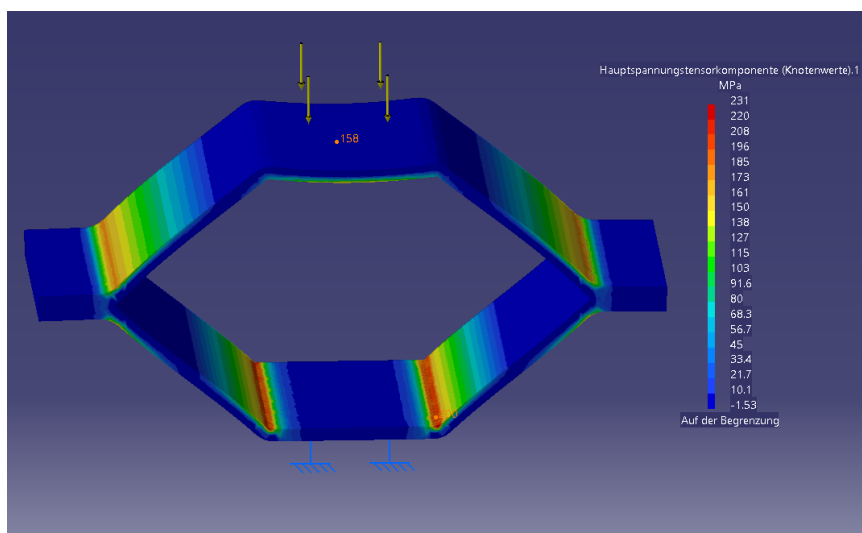


Abbildung 3.12 – Ergebnisse der Simulation der zweiten Optimierung für den Spezialfall

An dieser Simulation (Abbildung 3.12) tritt die Wichtigkeit der Mittelplatte hervor. Aufgrund der fehlenden Mittelplatte kann die Druckspannung nicht mehr in eine Zugbelastung umgewandelt

werden. Dies resultiert in einem großen Hebel. Es ergeben sich deutliche höhere Verformungen und dadurch auch deutlich höhere Spannungen.

Für die Simulationen mit Mittelplatte ergaben sich beispielhaft für eine Stärke von 5,0 mm folgende Ergebnisbilder:

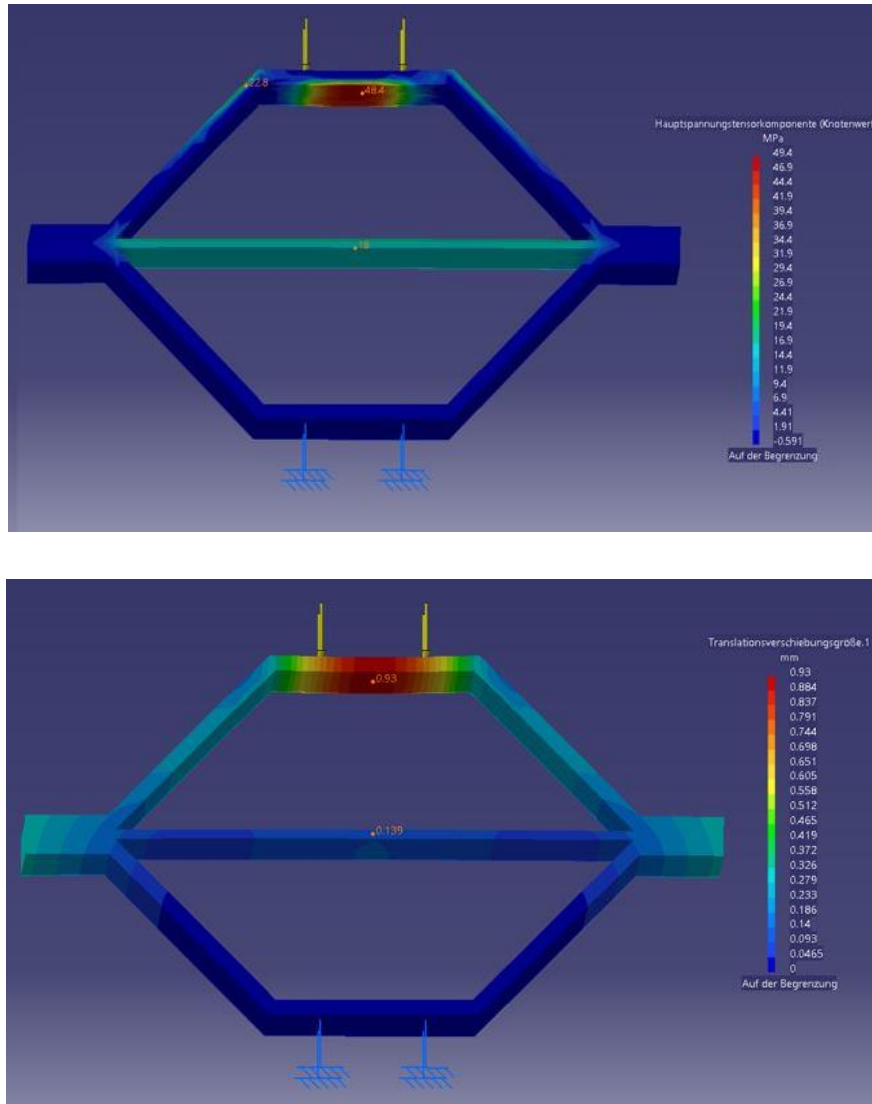


Abbildung 3.13 – Ergebnisse der Simulation der zweiten Optimierung für eine Mittelplattenstärke von 5,0 mm

Aus den Ergebnissen der Simulation wurden die maximal Spannungswerte an der oberen Platte des Hutprofils, an der Flanke des Hutprofils, sowie an der Mittelplatte entnommen. Für die Maximalwerte der Translation wurden die vertikale Translation an der oberen Platte des Hutprofils sowie die horizontale Translation an der Mittelplatte entnommen. (siehe Abbildung 3.7)

Es ergaben sich die in Tabelle 3.6 eingetragenen Ergebnisse. Die in der Tabelle 3.6 ausgelassenen Einträge in der Zeile für den Spezialfall ergeben sich daher, dass keine Mittelplatte bei diesem Fall eingebaut ist.

Tabelle 3.6 – Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

Stärke Mittelplatte	Spez. Gewicht	Translation oben	Translation mittig	Max. Spannung oben	Max. Spannung mittig	Max. Spannung Flanke
0,0 mm	- kg/m	12,00 mm	-	158 MPa	-	231 MPa
1,5 mm	2,321 kg/m	1,145 mm	0,284 mm	53,4 MPa	33,0 MPa	23,5 MPa
2,1 mm	2,389 kg/m	1,054 mm	0,208 mm	52,7 MPa	24,4 MPa	24,5 MPa
3,0 mm	2,536 kg/m	0,960 mm	0,157 mm	51,7 MPa	18,0 MPa	25,4 MPa
5,0 mm	2,874 kg/m	0,901 mm	0,146 mm	52,3 MPa	12,6 MPa	26,9 MPa

Der Spezialfall ohne Mittelplatte fällt wie erwartet deutlich aus der Reihe und wird daher auch nicht weiter analysiert. Dadurch wurde jedoch in der Simulation gezeigt, dass das Konzept der Zugseile der Natur auf die Hexagonstrukturen übertragen werden konnte.

Mit zunehmender Stärke der Mittelplatte nimmt auch das spezifische Gewicht der Hexagonstruktur mit Mittelplatte zu. Der Querschnitt vergrößert sich mit der Vergrößerung der Mittelplattenstärke.

Es zeigt sich zudem deutlich eine Tendenz, dass mit dünnerer Mittelplatte die horizontale Translation mittig erhöht wird. Zudem erhöht sich auch die vertikale Translation der oberen Platte des Hutprofils. In der Abbildung 3.14 sind die Spannungen im Verhältnis zueinander gesetzt. Oben beschreibt die jeweilige Spannung oben im Bauteil, Flanke die Flankenspannung und Mitte die Mittelspannung. Der Graph von „Summe“ beschreibt den „Oben/Mitte“ Graphen mit dem „Oben/Flanken“ Graphen zusammenaddiert.

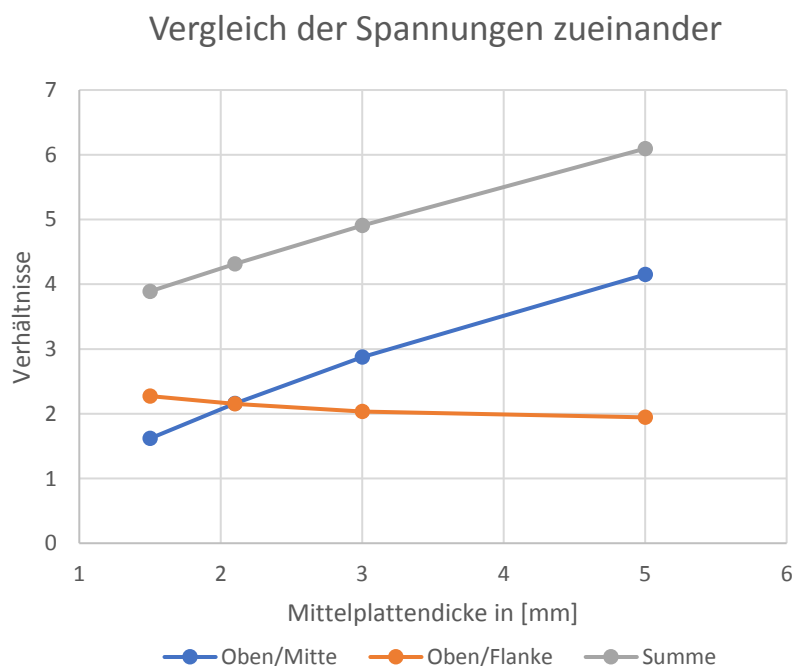


Abbildung 3.14 – Spannungsvergleich der zweiten Optimierung

Die Ausgangslage der vorherigen Simulation war eine Mittelschichtstärke von 5,0 mm. Da sich in dieser Simulation der Wert der Wandstärke sowie der Flankenwinkel innen nicht verändern, bleibt das Verhältnis der oberen Spannung zu dem Wert der Flankenspannung näherungsweise konstant.

Das Verhältnis von oberer Spannung zu der Mittelspannung zeigt einen deutlichen Anstieg, je stärker die Mittelplatte ist. Dies liegt daran, dass die Mittelplatte mit zunehmender Stärke immer starrer wird. Dadurch ermöglicht die Mittelplatte keine Translation in die Breite. Die Spannung muss an den Hutprofilen aufgenommen werden in Form einer erhöhten Biegespannung. Die Zugspannung in der Mittelplatte ist somit deutlich geringer.

Dies kann mit der Spannungs-Dehnungskurve von elastischen Werkstoffen begründet werden. Die Magnitude der horizontalen Ausdehnung ist ein Richtwert dafür, wieviel der Belastung in einen Zuglastfall umgewandelt wird.

Trotzdem ist der angestrebte maximal Spannungswert von 42,67 MPa nicht erreicht, weshalb eine weitere Optimierung durchgeführt werden muss.

3.2.6 Dritte Schleife: Optimierung in Abhängigkeit der Wandstärke des Hutprofils

In dieser Optimierung wird die Wandstärke des Hutprofils variiert, um die maximalen Spannungen im Hutprofil zu verringern. Aus den vorherigen Optimierungen werden die Mittelschichtstärke von 1,5 mm und der Flankenwinkel von 45° für alle weiteren Simulationen übernommen.

Die gleichbleibenden Parameter dieser Optimierung sind in Abbildung 3.15 zu sehen (grün). Die Parameter die sich ändern sind mit roten Pfeilen markiert.

In dieser Optimierung wird als einzige Variable die Wandstärke der Hutprofile geändert. Dadurch ändert sich die Gesamtbreite minimal.

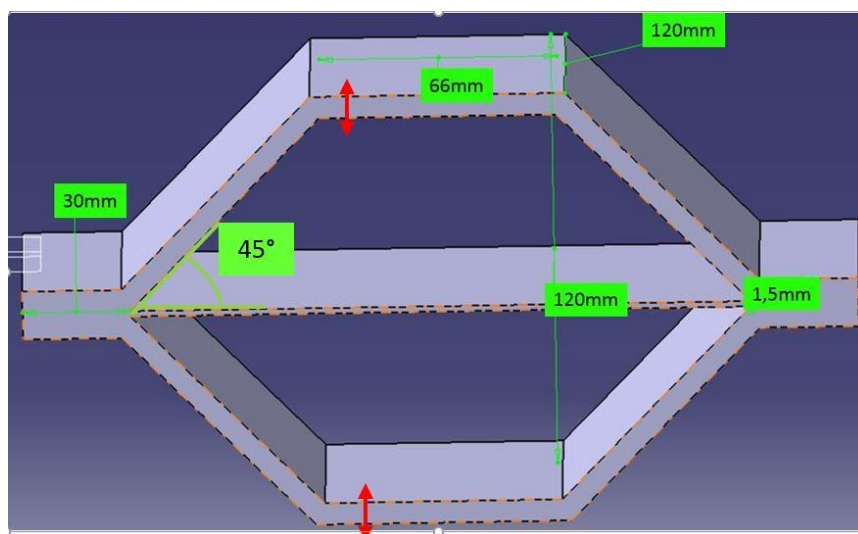


Abbildung 3.15 – Gleichbleibende Parameter der dritten Optimierung

Es werden vier verschiedene Wandstärken simuliert (4,0 mm; 5,0 mm; 6,0 mm; 7,0 mm).

Die Ergebnisse der Simulation sind beispielhaft in Abbildung 3.16 zu sehen:

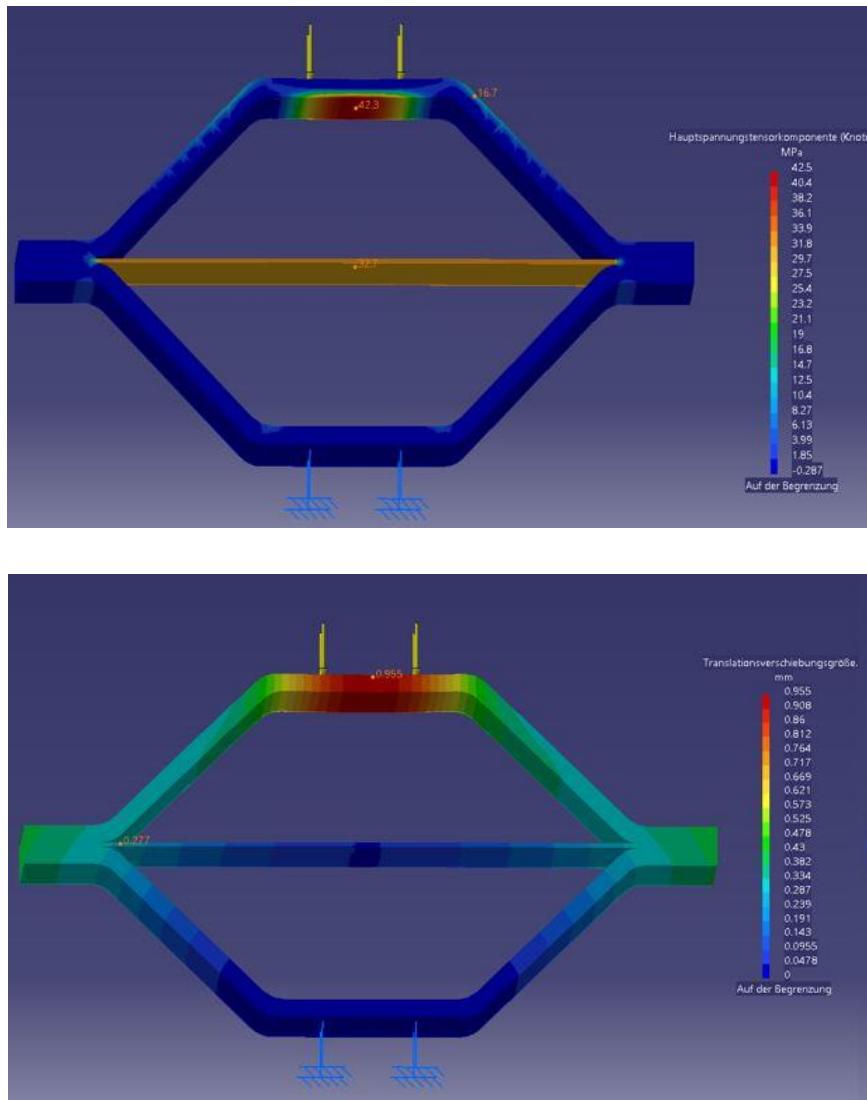


Abbildung 3.16 – Ergebnisse der dritten Optimierung der Wandstärke von 5,0 mm

Aus den Ergebnissen der Simulation wurden die maximal Spannungswerte an der oberen Platte des Hutprofils, an der Flanke des Hutprofils, sowie an der Mittelplatte entnommen. Für die Maximalwerte der Translation wurden die vertikale Translation an der oberen Platte des Hutprofils sowie die horizontale Translation an der Mittelplatte entnommen. (siehe Abbildung 3.7)

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst:

Tabelle 3.7 – Ergebnisse der dritten Versuchsreihe

Wandstärke	Spez. Gewicht	Translation oben	Translation mittig	Max. Spannung oben	Max Spannung mittig	Max Spannung Flanke
4,0 mm	1,928 kg/m	1,795 mm	0,298 mm	82,7 MPa	34,4 MPa	43,1 MPa
5,0 mm	2,321 kg/m	1,145 mm	0,284 mm	53,4 MPa	33,0 MPa	23,5 MPa
6,0 mm	2,702 kg/m	0,955 mm	0,273 mm	42,3 MPa	32,7 MPa	16,7 MPa
7,0 mm	3,077 kg/m	0,711 mm	0,248 mm	32,5 MPa	31,3 MPa	9,41 MPa

Das spezifische Gewicht verändert sich mit der Wandstärke, da der Querschnitt sich äquivalent dazu ändert.

Mit zunehmender Wandstärke verringert sich die horizontale Translation der Mittelplatte. Die vertikale Translation der oberen Platte des Hutprofils verringert sich ebenfalls. In einem direkten Vergleich zwischen der Konfiguration mit einer Wandstärke von 4,0 mm und einer Wandstärke von 7,0 mm reduziert sich die vertikale Translation um 61%. Dies ist auf den mit steigender Wandstärke sich erhöhenden Widerstand des Hutprofils gegen Biegung zurückzuführen.

Außerdem zeigt sich deutlich, dass eine Wandstärke von 4,0 mm zu wenig Unterstützung für die simulierte Belastung aufbringt. Dies zeigt sich in einer hohen vertikalen Translation und dadurch auch in einer signifikant erhöhten Belastung in der oberen Platte des Hutprofils sowie der Flanken.

Bei den Wandstärken 6,0 mm und 7,0 mm sind die Spannungen in einem akzeptierbaren Bereich. Die maximalen Spannungen überschreiten den Richtwert von 42,67 MPa nicht.

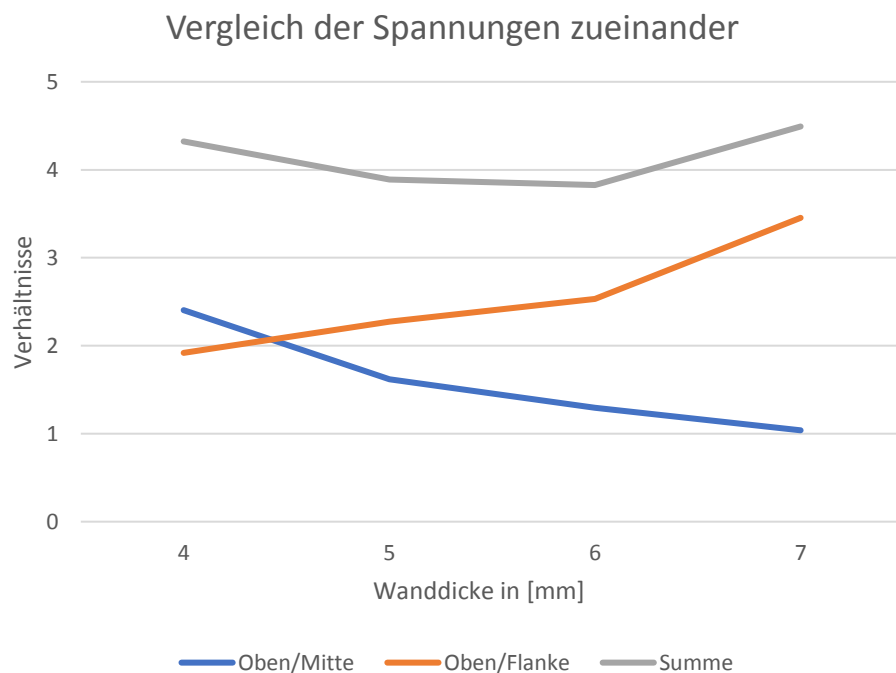


Abbildung 3.17 – Spannungsvergleich der dritten Optimierung

Auch hier bestätigen sich über den Graphen der „Summe“ (siehe Abbildung 3.17) die schon in den Ergebnissen festgestellten Beobachtungen.

Das Verhältnis von „Oben/Mitte“ nimmt mit steigender Wandstärke ab. Das Verhältnis von „Oben/Flanke“ nimmt mit steigender Wandstärke zu, da die maximale Spannung in der Flanke deutlich geringer wird im Vergleich zur maximalen Spannung oben. Die „Summe“ nimmt zu, obwohl beide Verhältnisse weiter auseinanderlaufen. Dies liegt an dem stärkeren Wachstum des Graphens „Oben/Flanke“.

Die Variante mit der Wandstärke von 6,0 mm erreicht den niedrigsten Wert von allen berechneten Simulationen. Da dieses Konzept zudem auch die maximal zulässige Spannung nicht überschreitet, wird an dieser Stelle keine weitere Optimierung durchgeführt.

Somit ist das Ergebnis der Optimierungen ein Bauteil mit einer Wandstärke von 6,0 mm, einer Mittelplattenstärke von 1,5 mm und einem Flankenwinkel von 45°.

3.2.7 Genaue FEM-Simulation der Hexagonstruktur mit Mittelplatte

Nachdem die Optimierungen abgeschlossen sind, wird das Bauteil zuletzt aufwändiger simuliert.

Für die nachfolgende Simulation wurde das parabolische Netz auf einen Knotenabstand von 2,0 mm reduziert. Der globale Fehlergrad wurde von 5 % auf 3 % reduziert. Durch diese Veränderungen hat sich die reine Rechenzeit von ca. 5 Minuten pro Simulation auf 30 Minuten erhöht. Die Genauigkeit ist um 66% gestiegen. Dies zeigt zudem die Wichtigkeit einer vereinfachten Simulation, da dies einen Großteil der Zeit spart, speziell in einem Arbeitsbereich in dem viele Simulationen gelaufen werden müssen.

In der genauen FEM-Simulation werden nun auch die einzelnen Orientierungen der Furnierlagen simuliert, in dem jede einzelne Schicht abgebildet und die Materialkennwerte für die jeweilige Schicht angepasst wird. Damit werden beim Hexagonbauteil auch die Sperrschichten miteinberechnet.

Für die Hutprofile werden 3 x 2,0 mm dicke Furniere simuliert, mit der Orientierung [0°/90°/0°]. Für die Mittelschicht werden 3 x 0,5 mm dicke Furniere simuliert, mit der Orientierung [0°/90°/0°]. Dadurch wird immer die jeweilige mittlere Schicht der Furniere als Sperrschicht simuliert und dementsprechend auch in CATIA angepasst. Da CATIA diese Sperrschichten sowie auch den Faseraufbau von Holz nur schwierig simulieren kann, wurde hier der Materialkennwert von Buche in CATIA für die Querrichtung angepasst. Dadurch müssen Querschichten als eigene Bauteile in CATIA aufgebaut werden.

Nach der Simulation werden die Ergebnisse der genauen Simulation mit dem vereinfachten Model verglichen und die Güte der vereinfachten Modelle in CATIA bestimmt.

Die Spannungsbilder der Simulation lieferten die in Abbildung 3.18 dargestellten Ergebnisse. Das obere Bild zeigt die genaue Simulation der Hexagonstruktur mit Mittelplatte, das untere Bild die vereinfachte Simulation der Hexagonstruktur mit Mittelplatte. Auf dem oberen Bild sind die Einzelnen Furnierlagen speziell in der Mittelschicht zu erkennen. Hier zeigt sich die Sperrschicht durch eine deutlich niedrigere maximale Spannung, wodurch diese grün eingefärbt ist. Aus den Ergebnissen der Simulation wurden die maximal Spannungswerte an der oberen Platte des Hutprofils, an der Flanke des Hutprofils sowie an der Mittelplatte entnommen. Für die Maximalwerte der Translation wurden die vertikale Translation an der oberen Platte des Hutprofils sowie die horizontale Translation an der Mittelplatte entnommen. (siehe Abbildung 3.18)

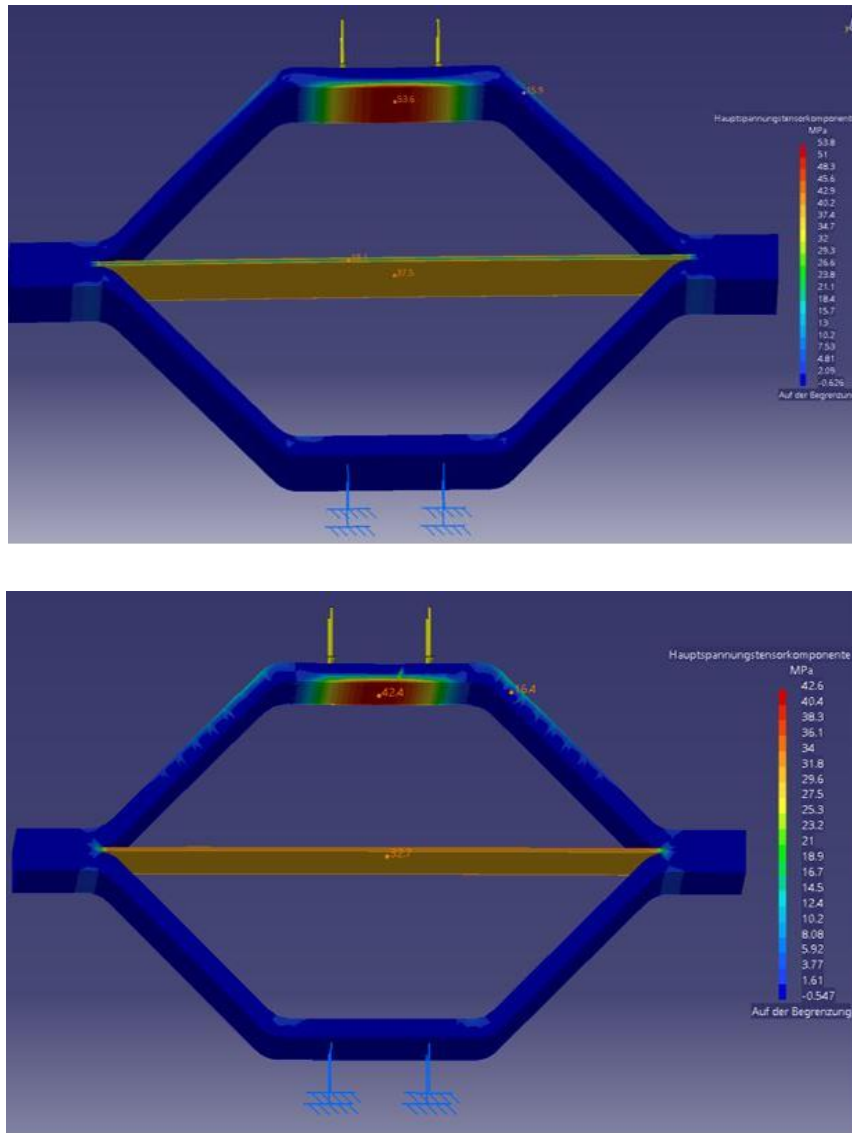


Abbildung 3.18 – Ergebnisse der genauen Simulation

Die Ergebnisse der genauen Simulation wurden mit den Ergebnissen aus der dritten Schleife für die Hexagonstruktur mit Mittelplatte mit 45° Flankenwinkel, 6,0 mm Wandstärke und 1,5 mm Mittelschichtstärke in Tabelle 3.8 zusammengefasst:

Tabelle 3.8 – Ergebnisse der genauen Simulation

Simulation	Spez. Gewicht	Translation oben	Translation mittig	Max. Spannung oben	Max Spannung mittig	Max Spannung Flanke
Vereinfacht	2,702 kg/m	0,955 mm	0,273 mm	42,3 MPa	32,7 MPa	16,7 MPa
Genau	2,715 kg/m	1,200 mm	0,357 mm	53,6 MPa	37,5 MPa	15,9 MPa
Vergleich	0,013 kg/m	1,256	1,307	1,267	1,147	0,952

Das spezifische Gewicht weist kleine Unterschiede auf. Diese können mit Berechnungsungenauigkeiten begründet werden.

Für die vereinfachten Simulationen wurde für die zulässigen Spannungen ein Sicherheitsfaktor von 1,5 angenommen. Aus den Ergebnissen der genauen Simulation zeigt sich im Vergleich (Genau/Vereinfacht), dass der Sicherheitsfaktor an keiner Stelle überschritten wurde. Es hätte ein Sicherheitsfaktor von 1,3 genügt, um den Effekt der Vereinfachung (keine Betrachtung der Querlagen) zu kompensieren.

Die maximale zulässige Spannung von 64 MPa ohne Sicherheitsfaktor wird bei der genauen Simulation an keiner Stelle überschritten, wodurch das Bauteil für die Belastung ausreichend ausgelegt ist.

Da durch eine Biegebelastung die äußeren Schichten am höchsten belastet werden, können die niedrigeren Flankenwerte auf eine höhere Belastung der inneren Schicht des Hutprofils zurückgeführt werden. Die maximale Spannung an der Flanke reduziert sich dadurch, dass die Biegebelastung durch die innere Schicht des Hutprofils abgefangen wird. Dadurch hat die äußere Schicht eine geringe Belastung bei der genauen Simulation. Aus demselben Grund ist die Translation mittig deutlich höher. Die genaue Simulation zeigt, dass es noch einen Sicherheitsfaktor in der geplanten Hexagonkonstruktion gibt. Dieser Sicherheitsfaktor zeigt, dass bei Furnieraufbauten auch einfach simuliert werden kann, wenn ein Sicherheitsfaktor von 1,3 eingeplant wird.

Die im Hexagonbauteil auftretenden Spannungen sind damit deutlich unter der zulässigen Spannung und es gibt die Möglichkeit die Hexagonstruktur mit Mittelplatte weiter zu optimieren. Das Konzept hat somit noch weiteres Leichtbaupotenzial.

In zukünftigen Arbeiten kann untersucht werden ob die Sperrlage (Mittellage) der Furnierschichte weiter reduziert werden kann. Es können statt mit einer 2 mm Sperrlage nur mit einer 1 mm Sperrlage gearbeitet werden und somit weiter Gewicht eingespart werden. Trotzdem sollte damit die zulässige Spannung nicht überschritten werden. Dies liegt daran, dass die Sperrlage nicht auf die maximalen Spannungsspitzen belastet werden, da diese von den äußeren Furnierlagen abgefangen werden. Die Sperrlage dient der Stabilisation der Hexagonstruktur mit Mittelplatte, weshalb diese weiter reduziert werden kann.

Dies könnte genauer in zukünftigen Arbeiten untersucht werden, wie groß die jeweiligen Sperrlagen sein müssen, um ähnliche Werte wie bei der Simulation errechnet zu bekommen.

3.2.8 Fazit der Simulativen Optimierung der Hexagonstruktur mit Mittelplatte

In diesem Kapitel wurde die Hexagonstruktur mit Mittelplatte auf verschiedene Parameter optimiert, so dass die Zugbelastung in der Hexagonstruktur auf das Zugseil in Form einer Mittelplatte verteilt wurde.

Durch die erste Optimierung, in welcher der Flankenwinkel optimiert wurde, zeigte sich, dass bei den höheren Flankenwinkeln (60° und 80°) die höchste maximale Spannung am geringsten ist. Auf der anderen Seite aber die Zugbelastung der Mittelplatte zu niedrig ausgefallen ist. Daher liefert der Flankenwinkel von 45° für die Zugbelastung der Mittelplatte ein gutes Mittelmaß zwischen der

maximal auftretenden Spannung und der Spannung in der Mittelplatte. Dennoch war die Mittelplattenstärke noch zu groß, wodurch die Belastung nicht von der Mittelplatte abgefangen werden konnte.

Die Mittelplattenstärke wurde in einem nächsten Schritt optimiert. In diesem Schritt konnte eine Mittelplattenstärke von 1,5 mm als ausreichend festgestellt werden. Trotzdem war die erforderliche Zielsetzung noch nicht erreicht, da die auftretenden maximalen Spannungen noch zu groß waren.

Damit die Zielsetzung erfüllt werden kann wurde in einem letzten Schritt die Wandstärke weiter optimiert, wodurch die erforderlichen maximalen Spannungen unterschritten wurden. Eine Wandstärke von 6 mm stellte sich als ausreichend aus.

Diese Konfiguration wurde in allen weiteren Simulationen als festgelegte Parameter benutzt.

Danach wurde die vereinfachte Simulation mit der genauen Simulation verglichen. Die genaue Simulation stellte sich zusammen aus dem genauen Aufbau der Hexagonstruktur mit Mittelplatte, in welcher auch die Sperrschichten mitberechnet werden. Hierbei stellte ich heraus, dass die vereinfachte Simulation in allen Bereichen um den Faktor 1,3-fach mehr aushalten konnte als die genaue Simulation. Dies resultierte in einem Sicherheitsfaktor von 1,3. Mit diesem Sicherheitsfaktor lassen sich Holz furnieraufbauten auf vereinfachte Konzepte reduzieren, wodurch ein Großteil des Rechenaufwands gespart werden kann.

Für eine Überprüfung der Hexagonstruktur mit Mittelplatte werden in einem nächsten Schritt die Bauteile aufgebaut und an einer UPM (Universalprüfmaschine) in einem Druckversuch geprüft.

3.3 Validierung des Konzepts anhand von Versuchen

3.3.1 Herstellung eines Werkzeuges

Zur Fertigung der Probekörper mussten zunächst die Formen für ein Pressenwerkzeug hergestellt werden. Als Presswerkzeug wurden Schraubzwingen verwendet. Die Hexagonstruktur mit Mittelplatte wurde dabei aus zwei Hutprofilen und aus einer Mittelschicht aufgebaut, jeweils bestehend aus Schichten von Furnierlagen.

Die Form für das Hutprofil wurden in mehreren Schritten hergestellt. In einem ersten Schritt wurde die Form aus einer Multiplexbirkenplatte mit 24 mm Dicke gefräst. Dies wird mit einer CNC-Holzfräse verwirklicht (siehe Abbildung 3.19). Während des Fräsvorgangs musste die CNC-Holzfräse wiederholt gekühlt werden, weshalb auch teilweise dunklere Stellen in Abbildung 3.19 zu sehen sind. Diese wurden durch unzureichende Kühlung verursacht.

Nachdem die Formen in die Struktur gefräst wurden, wurden diese mit einer Säge voneinander getrennt und an den Seiten zusammengeklebt.

Zusätzlich wurden Gewindestangen durch die Löcher im Bauteil geführt, welche die Oberflächen ausrichten (siehe Abbildung 3.20).



Abbildung 3.19 – CNC-Fräse



Abbildung 3.20 – Werkzeug des Hutprofils

Zusätzlich wurden Gewindestangen durch die Löcher im Bauteil geführt, welche die Oberflächen ausrichten (siehe Abbildung 3.20). Nachdem die Formen getrocknet waren, musste die Oberfläche der Holzform mit einem Schleifwerkzeug bearbeitet werden, um Kleberrückstände zu entfernen. In einem letzten Schritt wurde eine Teflonfolie auf die Oberfläche geklebt, damit der spätere Holzleim nicht die Formen verkleben konnte.

Die Form für die Mittelschicht wurde durch zwei Multiplexbirkenplatten verwirklicht, welche aufeinandergedrückt wurden. Auch hier wurde eine Teflonfolie auf die Innenseite geklebt.

3.3.2 Herstellung der Hexagonstrukturen

Die Einzelteile der Hexagonstruktur mit Mittelplatte wurden aus Furnieren hergestellt. Geklebt wurde mit dem Klebstoff Ponal Classic Weißleim. Dies ist ein Kunstharzleim auf Basis von Polyvinylacetat. [7] Die Mittelplatte wurde in einer 0°-90°-0° Konfiguration geklebt. Das heißt, es wird die oberste und unterste Schicht in Zugbeanspruchung parallel mit der Faserrichtung des Furnierholzes belastet. Die Mittelschicht ist die sogenannte Sperrschicht, welche im 90°-Winkel dazu gelegt wird.

Danach wurde diese Konstruktion für mindestens 24 Stunden mit Schraubzwingen in die Form gepresst, damit der Kleber aushärten konnte. Zuletzt wurde die Mittelplatte mit einer Holzsäge in die passende Form gebracht.

Für die Hutprofile wurden die Holzfurniere abwechselnd in 0° und in 90° der Faserrichtung gelegt bis zu dem Erreichen der beabsichtigten Stärke (siehe Abbildung 3.21). Hierbei ist darauf zu achten, dass die später innerste Schicht des Hutprofils eine 0° Richtung hat. Dies liegt daran, dass diese Schicht die größten Zugkräfte des Hutprofils aufnehmen muss, und daher nicht als Sperrschicht (90°) konfiguriert sein darf.

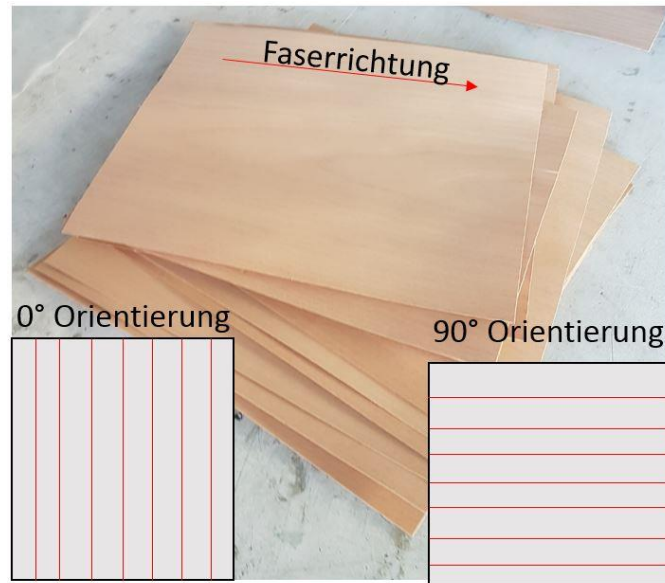


Abbildung 3.21 – Faserorientierung

Nach dem Verkleben der einzelnen Schichten wurde das Hutprofil mit Schraubzwingen für mindestens 24 Stunden in die Hutprofilform gepresst, damit der Kleber aushärten konnte. Zuletzt wurden die einzelnen Hutprofile in eine passende Form mithilfe einer Holzsäge gesägt.

Nachdem die Einzelteile fertig gestellt wurden, konnten diese aneinandergeklebt werden. Hierbei wurden an die jeweiligen Enden des Hutprofiles Platten mit Teflonfolie gelegt, um ein ungewolltes ankleben der Schraubzwingen zu vermeiden. Nachdem die fertige Konstruktion wiederum 24 Stunden getrocknet war, ist die Hexagonstruktur mit Mittelplatte fertiggestellt worden.

Es wurden drei verschieden aufgebaute Probekörper erstellt (siehe Abbildung 3.22, Abbildung 3.23 und Abbildung 3.24). Diese haben dieselbe Breite und Länge, unterscheiden sich jedoch in den einzelnen Furnierlagen.



Abbildung 3.22 – Probekörper 1



Abbildung 3.23 – Probekörper 2



Abbildung 3.24 – Probekörper 3

Die unterschiedlichen Furnierlagen der Probekörper sind in Tabelle 3.9 zu finden. Die Gesamtstärke beschreibt jeweils die Stärke der einzelnen Furniere zusammenaddiert. Hier ist die Dicke des Holzleimes nicht miteinberechnet, wobei diese auch im optimalen Fall in das Holz einziehen sollte.

Tabelle 3.9 – Aufbau der einzelnen Probekörper

Probekörper	1	2	3
Hutprofil 0°/90°*	0,6 mm/0,6 mm	0,6 mm/0,9 mm	0,6 mm/0,9 mm
Mittelplatte 0°/90°/0°	0,6 mm/0,9 mm/0,6 mm	0,9 mm/0,6 mm/0,9 mm	0,6 mm/0,9 mm/0,6 mm
Gesamtstärke Hutprofil	6,0 mm (5 × 0,6 mm/0,6 mm)	6,0 mm (4 × 0,6 mm/0,9 mm)	6,0 mm (4 × 0,6 mm/0,9 mm)

*0°/90° ist auf die Gesamtwandstärke von jeweils 6 mm bezogen. Hier wurden diese Schichten im Wechsel gelegt. Die Angaben 0°/90° sind in Abbildung 3.21 erklärt.

Dadurch dass die Probekörper von Hand gefertigt waren, hatten die Probekörper nicht genau die Maße von 120 mm Deckenweite. Dies lag daran, dass diese aufgrund von Klebefehlern leicht gekürzt werden mussten. Die Deckenweite lag dementsprechend für alle Probekörper bei 110 mm.

Die Deckenbreite von 66 mm konnte bei allen Probekörpern eingehalten werden (siehe Abbildung 3.25).



Abbildung 3.25 – Maße der Probekörper

3.3.3 Fehlerquellen und Lösungen bei der Herstellung der Hexagonstrukturen

Eine der Fehlerquellen bei der Herstellung von Holzlaminaten, ist eine unzureichende Menge des Klebers. Dies ist speziell in der nichtmaschinellen Herstellung ein größeres Problem, da der Kleber einheitlich auf der gesamten Klebefläche verteilt werden muss. Wenn zu wenig Kleber verwendet wird, können sich die einzelnen Schichten der Holzurniere nicht verbinden, wodurch sich später Lücken im Laminat bilden können.

In Abbildung 3.26 ist ein solcher Fehler zu erkennen. Die Furniere lösen sich selbst wieder und bilden Lücken. Dieser Fehler kann nicht nachbearbeitet werden. Ohne ein Aufsägen des Werkstückes ist von außen nicht erkenntlich, ob das Nachbessern erfolgreich war. Des Weiteren ist nicht sichtbar, ob sich Delaminationen im Inneren des Laminats gebildet haben.



Abbildung 3.26 – Bauteil mit zu wenig Kleber

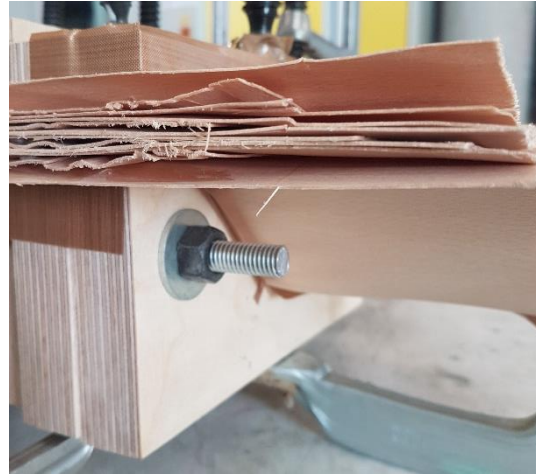


Abbildung 3.27 – Überstand am Rand des Bauteils

Eine einfache Lösung dieses Problems ist das Verwenden von einer dickeren Klebeschicht. Zusätzlich muss ein sauberes Zusammenlegen der einzelnen Furnierschichten erfolgen, sodass keine Luftblasen entstehen können. Der überschüssige Kleber, welcher an den Rändern austritt, kann im nach hinein leicht mit Schmirgelpapier entfernt werden.

Ein weiterer Fehler ist das Verschieben einzelner Holzurniere während des Formens. Dies wird durch die Gleitwirkung des überschüssigen Klebers begünstigt. Hierbei „schwimmen“ die einzelnen Furnierlagen aufeinander und verschieben sich unter leichten Belastungen. In Abbildung 3.27 ist eine leichte Verschiebung der Furniere zu sehen.

Eine mögliche Lösung dieses Problems ist, einen deutlichen Überstand an den Seiten der Furniere zu lassen, wie auch in Abbildung 3.27 zu sehen ist. Dieser Überstand kann später beim Zurechtsägen der Bauteile entfernt werden.

3.3.4 Versuche an liegenden Hexagonstrukturen

In einer ersten Versuchsreihe wurden die Probekörper 1 und 2 liegend auf Druck geprüft (). Dafür wurden die Probekörper in die UPM wie in Abbildung 3.28 gezeigt eingespannt. Als Abbruchbedingung wurde ein Spannungsabfall von 80 % oder eine vertikale Translation von 30 mm gewählt. Die Versuche wurden jeweils bis zum Eintreten der Abbruchbedingung durchgeführt. Die UPM ist mit einer Prüfgeschwindigkeit von konstanten 10 mm/min gefahren.



Abbildung 3.28 – Versuchskörper 1 in UPM

Das erste Probekörper ist bei 9.959 N gerissen, das zweite Probekörper ist bei 8.616 N gerissen (siehe Abbildung 3.29). Die beiden auf Druck geprüften Hexagonstrukturen (siehe Abbildung 3.30 und Abbildung 3.31) sind beide wie zu erwarten in der Mittelplatte zuerst gerissen.

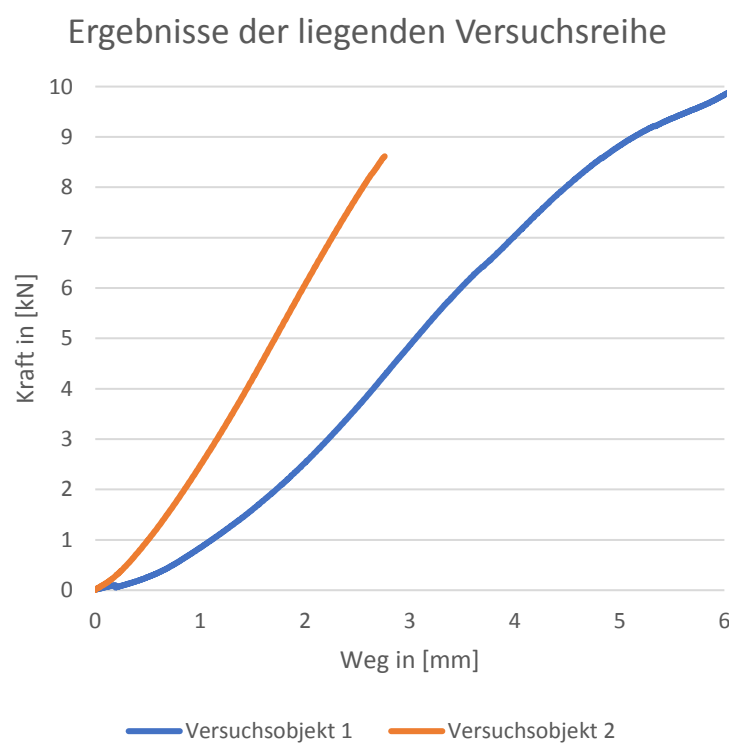


Abbildung 3.29 – Ergebnisse der liegenden Versuchsreihe

An dem Spannungs-Dehnungsdiagramm lässt sich der Zeitpunkt des Risses der Mittelplatte genau bestimmen. Nachdem diese gerissen ist, wurde die Prüfung direkt beendet, da es sofort zu einem Spannungsabfall von 80 % kam.



Abbildung 3.30 – Probekörper 1 mit gerissener Mittelplatte

Um den Einfluss der Mittelplatte erneut zu validieren wurden die Probekörper mit gerissener Mittelplatte weiter geprüft. Hierbei wurden maximal 10 % der vor Bruch erreichten Spannungen erreicht. Dies zeigt zudem nochmals auf (vergleiche Kapitel 3.2.5), dass die Mittelplatte Zugspannungen aufnimmt und somit die Biegespannung umwandeln kann. Damit ist die Mittelplatte wichtiger Bestandteil des Konzepts.



Abbildung 3.31 – Probekörper 2 mit gerissener Mittelplatte

Die beiden Probekörper weisen trotz annähernd gleicher Bauteilabmaße eine sehr unterschiedliche Translationsbewegung bis zum Riss auf.

Beim ersten Probekörper konnte bis zum Riss eine Translation von etwa 6,4 mm zurückgelegt werden, wohingegen beim zweiten Probekörper eine Translation von 2,7 mm ausgereicht hat, um die Mittelplatte zum Reißen zu bringen. Der erste Probekörper konnte auch eine um 1.343 N höhere Last ertragen als der zweite Probekörper.

Dieses Verhalten kann mit den unterschiedlichen Hutprofilurnierlagen der zwei Probekörper begründet werden. Der erste Probekörper hat eine 0,6/0,6 mm Holzurnierlagenschicht im Wechsel

(0°/90°), wohingegen der zweite Probekörper eine 0,9/0,6 mm Holz furnierlagenschicht im Wechsel (0°/90°) hat. Dadurch hat der zweite Probekörper einen größeren Anteil an Zugfasern als der erste Probekörper (50 % Zugfasern bei Probekörper 1 zu 67 % bei Probekörper 2), wodurch das Hutprofil eine höhere Steifigkeit gegenüber Zug aufweist. Dadurch wird die Mittelschicht des zweiten Probekörpers höher belastet bei niedrigerer Translation. Deshalb gibt es hier einen so großen Unterschied in der vertikalen Translation bis zum Abriss der Mittelplatte. Diese Erkenntnis zeigt sich auch in Abbildung 3.29. Der Graph des zweiten Probekörpers hat einen deutlich größeren Anstieg der aufgenommenen Kraft im Verhältnis zu seiner vertikalen Translation.

Die erreichten Kräfte von 9.959 N bzw. 8.616 N zeigen zudem, dass das Hexagonkonzept erfolgreich ist. Unter Berücksichtigung der Alterungserscheinungen und der Dauerfestigkeit (siehe Kapitel 3.2.2) sollten immer noch maximale Kräfte von 6.373 N bzw. 5.514 N als maximal mögliche Kraft ausgehalten werden.

Da die Probekörper mit einer Deckenweite von 110 mm statt 120 mm gebaut wurden (siehe Kapitel 3.3.2) können die ausgehaltenen Lasten dementsprechend erhöht werden. Da die Deckenweite einen linearen Verlauf im Bezug zu den auszuhaltenden vertikalen Druckkräften aufweisen, können die maximal möglichen Kräfte um 9% erhöht werden. Unter Berücksichtigung der Alterung und der Dauerfestigkeit ergeben sich auf 120 mm gerechnete maximale Kräfte von 6.952 N bzw. 6.015 N.

Dies übertrifft den in der Auslegung (Kapitel 3.2.2) definierten Wert von 5.520 N deutlich.

Der Probekörper 2 weist eine höhere Steifigkeit gegenüber vertikalen Kräften auf und dadurch eine geringere vertikale Translation. Dadurch dass die Bodenstruktur eine Batterie aufnehmen soll, sind zu große vertikale Translationen schwierig abzufangen. Zudem kann der Probekörper 2 über eine stärkere Mittelplatte die geringere maximal mögliche Spannung gegenüber des Probekörper 1 ausgleichen. Zudem auch für den Probekörper 2 die Zielsetzung erreicht wurde und es in diesem Fall keine Erhöhung der Belastbarkeit notwendig ist.

3.3.5 Versuche an stehenden Hexagonstrukturen

Der dritte Probekörper wurde stehend geprüft. Der dritte Probekörper wurde somit als Wabenstruktur auf eine Druckbelastung geprüft. Als Abbruchbedingung wurde ein Spannungsabfall von 80 % oder eine maximale vertikale Translation von 30 mm gewählt. Der Versuch wurde bis zum Eintreten einer der beiden Abbruchbedingung durchgeführt. Die UPM ist mit einer Prüfgeschwindigkeit von konstanten 10 mm/min gefahren.

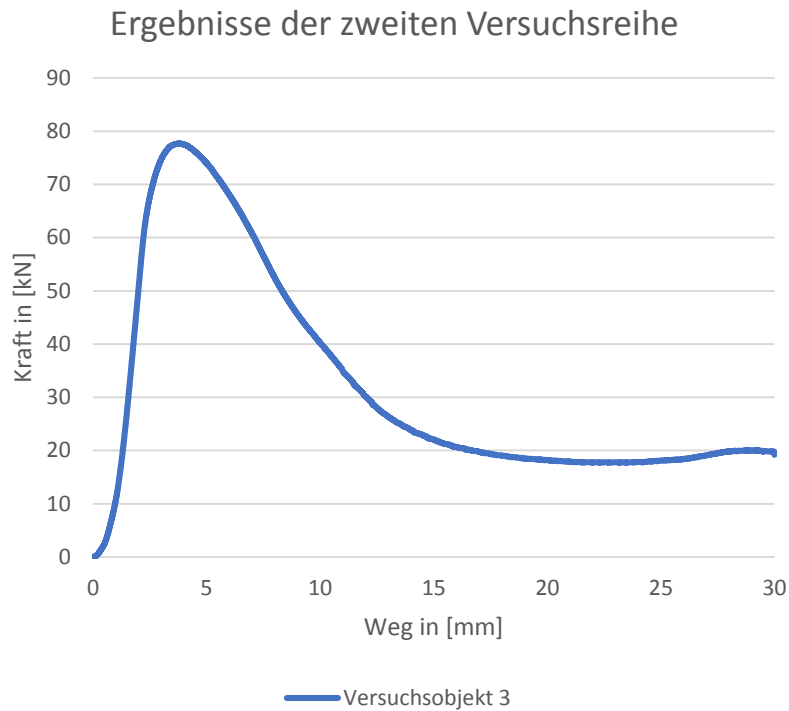


Abbildung 3.32 – Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

Da das Bauteil kontinuierlich und nicht schlagartig versagt, konnte im Versuch eine hohe Formänderung erreicht werden. Daher hat die UPM den Versuch nach einer vertikalen Translation von 30 mm abgebrochen. Dies ist in Abbildung 3.32 zu sehen. Auffällig ist die deutlich höhere Belastbarkeit im Vergleich zu der liegenden Hexagonstruktur mit Mittelplatte. Zudem ist nach einer anfänglichen Spannungsspitze von 78 kN eine beinahe konstante Belastbarkeit von 20 kN zu erkennen.



Abbildung 3.33 – Gerissenes Bauteil Versuch 3

Aus diesem Kraft-Weg-Diagramm zeigt sich der Krafteinbruch erst beim Aufspalten der Wabenstruktur (siehe Abbildung 3.33). Eine interessante Beobachtung während des Versuches war, dass der

Probekörper dem Faltenbeulen ähnliche Verhalten aufzeigte. Erst nachdem die Faltbeulen das Holz in einen zu spitzen Winkel bogen, brach das Holz (siehe Abbildung 3.33).

Anhand der Abbildung 3.33 ist auch der Grund für die Reduktion der maximal ausgehaltenen Spannung von 78 kN auf ca. 20 kN zu sehen. Nachdem der Probekörper anfang sich zu Falten und dadurch auch zwischen den Schichten sich zu lösen, verlor die Wabenstruktur ihre anfängliche hohe Steifigkeit.

Die anschließende Belastbarkeit von 20 kN wurde durch das Auftrennen der einzelnen Furnierschichten verursacht. Die Kleberschicht zwischen den Schichten trennt sich immer weiter auf, was zum Abschälen der Furnierlagen voneinander führt.

Der dritte Versuch mit der stehenden Hexagonstruktur mit Mittelplatte zeigt, dass Hexagonstrukturen nicht nur als Querbalken benutzt werden können, sondern auch lokal als Wabenstruktur dienen können. Dies bietet den Vorteil, dass keine neue Form für die Herstellung der Strukturen erstellt werden muss, sondern lediglich bereits vorhandene Hexagonstrukturen auf das richtige Maß zurechtgesägt werden müssen.

Zudem ist durch die hohe Belastbarkeit sowie die erhöhte Energieabsorption dieser Wabenstruktur die Hexagonstruktur mit Mittelplatte auch als mechanische Energieabsorption in einem Crashfall nutzbar. Dies macht die Hexagonstruktur mit Mittelplatte vielseitiger einsetzbar.

3.3.6 Fazit der Versuche

Es wurden zwei der drei Probekörper auf dieselbe Belastung wie in der Simulation geprüft.

Die Probekörper sind bei einer Kraft von 9.959 N bzw. 8.616 N (Probekörper 1 bzw. Probekörper 2) gerissen. Die ausgelegte Kraft für die Hexagonstrukturen in der Simulation war 5.520 N (siehe Kapitel 3.2.1). Bei dieser Auslegung waren jedoch verschiedene Sicherheitsfaktoren miteinberechnet worden (siehe Kapitel 3.2.2). Die Probekörper waren zudem schmaler als in der Simulation, wodurch die erzielten Ergebnisse um 9% hochskaliert werden müssen, um sie mit der Simulation vergleichen zu können.

Die angeführten Sicherheitsfaktoren waren jeweils ein Faktor von 0,8 für die Alterung und die Dauerfestigkeit. Im Versuch wurde auf die Maximalbelastung geprüft, weshalb von diesem Wert die oben genannten Faktoren abgezogen werden müssen. Trotzdem haben beide Versuchskörper die als Ziel gesetzten 5.520 N überschritten und somit gezeigt, dass die Hexagonstruktur mit Mittelplatte funktioniert.

Zudem sind die Probekörper unterschiedlich gegenüber der in der Simulation ausgelegten Hexagonstruktur mit Mittelplatte. Die in der Simulation ausgelegte Hexagonstruktur mit Mittelplatte hat eine Mittelplattenstärke von 1,5 mm. Zusätzlich sind in der Simulation die Hutprofile aus drei Furnierschichten aufgebaut. Bei den Probekörpern wurden die Hutprofile aus mehreren dünneren Furnierschichten aufgebaut.

Ein direkter Vergleich ist deshalb nicht möglich, da keine Vergleichbarkeit gegeben ist.

Trotzdem können einige Erkenntnisse aus der Versuchsreihe gewonnen werden.

- Das Hexagonbauteil reißt in der liegenden Konfiguration schlagartig, wenn die Mittelplatte zuerst nachgibt. Dies kann sinnvoll sein, wenn festgestellt werden muss, ob das Bauteil noch intakt ist. Hierfür können an der Mittelplatte Sensoren angebracht werden, welche einen Riss bzw. eine Überbelastung direkt bemerken.
- Es besteht noch weiteres Leichtbaupotenzial. Die Versuche mit dem stehenden Bauteil haben gezeigt, dass die Mittelplatte deutlich weniger Belastung aushält, als die Hutprofile. Die Hutprofile sind demnach noch überkonstruiert und können noch weiter reduziert werden. Hier bestätigt sich die Vermutung aus Kapitel 3.2.7 wonach die Hutprofile weiter reduziert werden können. Als Beispiel wurden die Verringerung der Dicke der Sperrschicht in den Hutprofilen genannt.

Der dritte Probekörper wurde als eine stehende Hexagonstruktur mit Mittelplatte (Wabenstruktur) geprüft. Hierbei konnten deutlich höhere Kräfte ausgehalten werden als bei der liegenden Hexagonstruktur mit Mittelplatte. Zudem kam es nicht zu einem direkten Spannungsverlust in dem Bauteil, sowie auch einer konstanten Energieabsorption später in dem Bauteil. Dadurch kann die Hexagonstruktur mit Mittelplatte auch als mechanische Energieabsorption von kinetischer Energie dienen.

- Das Hexagonbauteil ist demnach vielseitig einsetzbar. Sowohl liegend als auch stehend kann das Hexagonbauteil die benötigten Lasten aushalten, welche aus dem Lastenheft abgeleitet wurden. Das stehende Bauteil hält deutlich über den benötigten Kräften aus, und kann daher auch für höhere Lasten verwendet werden.

3.4 Simulativer Vergleich des Kerns zu alternativen Querbalken

Damit das Hexagonkonzept auf als Querbalkenkonzept validiert werden kann, werden in diesem Abschnitt Vergleiche zu anderen Querbalkenkonzepten aufgezeigt. Dafür wird die Hexagonstruktur mit Mittelplatte mit drei weiteren Querbalken verglichen.

Jeder der weiteren Querbalken wurde mit einem gleichen Gewicht wie die Hexagonstruktur mit Mittelplatte auf die Breite hat aufgebaut, damit ein gewichtsneutraler Vergleich gezogen werden kann. Dementsprechend wurde jeder Querbalken einem Gewicht von 3,288 kg auf die Gesamtlänge von 1.280 mm konstruiert. Die Gesamtlänge entspricht der Breite der Bodenstruktur (siehe Anhang A1). Zwei dieser Querbalken sind ebenfalls aus Holz aufgebaut, hierbei kann das Hexagonkonzept in einem direkten Vergleich die Vor- und Nachteile gegenüber anderen Querbalkenkonzepten zeigen.

Der dritte Querbalken ist aus Aluminium aufgebaut. Aluminium ist im Leichtbau häufig zu finden, weshalb dieser Werkstoff einen guten Vergleich zu dem Werkstoff Holz aufzeigen kann.

In Abbildung 3.34 sind die verschiedenen Querbalken zu sehen, welche mit der Hexagonstruktur mit Mittelplatte verglichen werden. Die zwei linken Querbalken sind aus derselben Holzart wie die

Hexagonstruktur mit Mittelplatte aufgebaut, der rechte Querbalken ist aus Aluminium aufgebaut. Der mittlere Holzbalken, sowie auch der Aluminiumbalken sind mit einem Doppel-T-Profil konstruiert. Das Doppel-T-Profil sorgt für eine hohe Festigkeit bei minimalem Gewicht, da es über seine Form eine hohe Trägheit gegenüber Biegungen in der z-Richtung aufweisen kann.

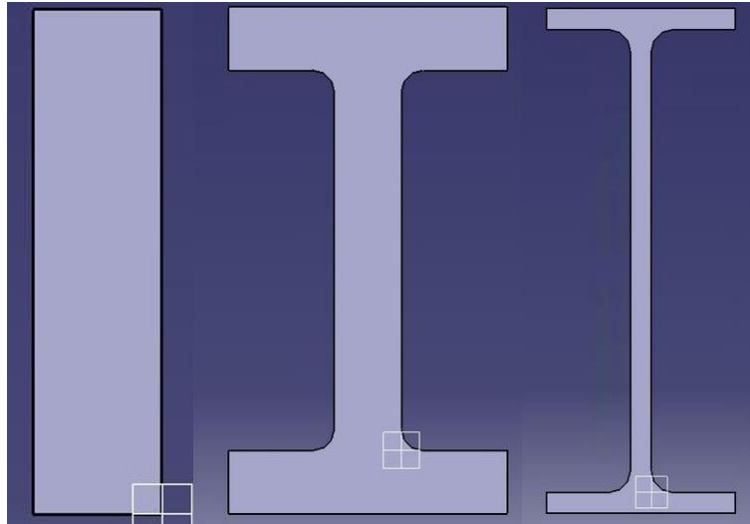


Abbildung 3.34 – Vergleichsquerbalken von links nach rechts: „Holzbalken“, „Holz-Doppel-T-Träger“ und „Aluminium-Doppel-T-Träger“

Der Holzbalken ist als eine einfache Lösung konzeptioniert und soll einen direkten Vergleich mit einem reinen Holzbalken aufzeigen.

Da in dem Projekt der Bodenstruktur auf nachhaltige Materialien gesetzt werden soll, ist Aluminium keine direkte Option, da Aluminium hohe Umweltbelastungen in der Herstellung mit sich bringt. Zudem sind Aluminiumlegierungen schwierig zu recyceln, da diese sich nichtmehr auftrennen lassen. Es müsste sich demnach ein Recyclingkonzept überlegt werden, falls Aluminium benutzt werden sollte. Dadurch würde die Bodenstruktur zusätzlich zu der erhöhten Umweltbelastung durch Aluminium auch teurer und aufwändiger in der Umsetzung werden.[13]

Daher wird Aluminium hier lediglich als Referenz benutzt um die Durchbiegung einordnen zu können.

3.4.1 Parameter der Simulationen

Die Querbalken werden auf die Gesamtinnenbreite der Güterkapsel simuliert. Somit sind die Querbalken nur an beiden Rändern befestigt, da dies den späteren Anbindungspunkten der Bodenstruktur zum Driveboard entspricht. Die Querbalken werden, wie auch in der Simulation für die Optimierung des Hexagonkonzeptes, auf den Worst-Case simuliert.

Das Worst-Case-Szenario ergibt sich für die Bodenstruktur in der Variante quer (siehe Abbildung 3.5), wenn nur zwei Querträgern belastet werden. Mit der Maximalbelastung aus dem Lastenheft von 1250 kg pro Palette resultiert dies in einer Belastung von 12.260 N. Basierend auf einer Belastung beider Querträger, wird die Kraft gleichmäßig auf jeweils 6.130 N pro Querträger aufgeteilt. Durch eine Auslegung auf die Fahrt muss die 3G-Senke berücksichtigt werden. Die 3G-Senke beschreibt die größte

in einer Fahrt anzunehmende Belastung, die ein bewegter Körper erfährt. Durch die 3G-Senke erhöht sich die erforderte maximale Belastung somit auf das dreifache, also auf 18.390 N.

Die Querbalken werden jeweils rechts fest eingespannt (in CATIA mit dem blauen Symbol gekennzeichnet, siehe Abbildung 3.35) und links mit einem Loslager festgespannt (in CATIA mit dem roten Symbol gekennzeichnet, siehe Abbildung 3.35). Das Loslager ist ausschließlich auf der Achse beweglich, die es mit dem Festlager aufspannt. Die belastende Kraft von 18.390 N wird von oben flächig auf das Bauteil übertragen (durch die gelben Pfeile dargestellt, siehe Abbildung 3.35).

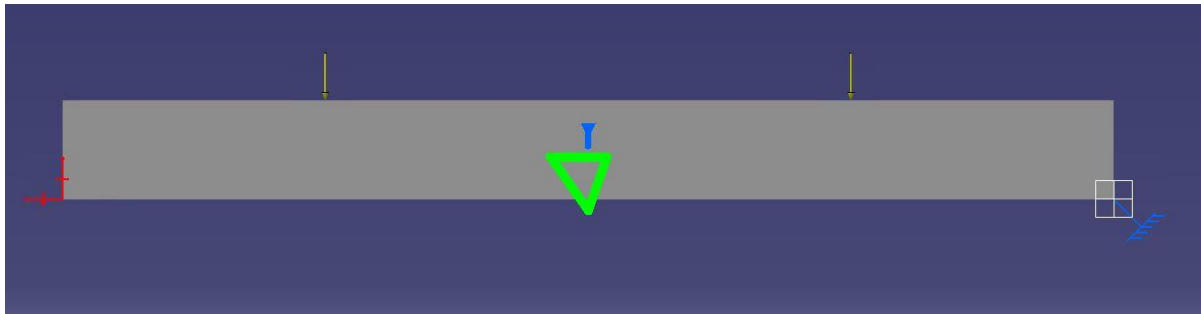


Abbildung 3.35 – Parameter der Simulation der Querträger

Dadurch werden die Querbalken auf eine reine Biegebelastung belastet. Durch das Loslager auf der linken Seite ergeben sich die maximalen vertikalen Translationen der Querbalken unter einer solchen Belastung. Sollten die Balken in der späteren Bodenstruktur fest eingespannt werden, wird die Translation geringer ausfallen.

3.4.2 Simulation der Querträger

In Abbildung 3.36 werden die Ergebnisse einer solchen Simulation gezeigt. In diesem Fall wird der Holz-Querträger gezeigt, welche eine Durchbiegung in der Mitte durch die verursachte Kraft erfährt.

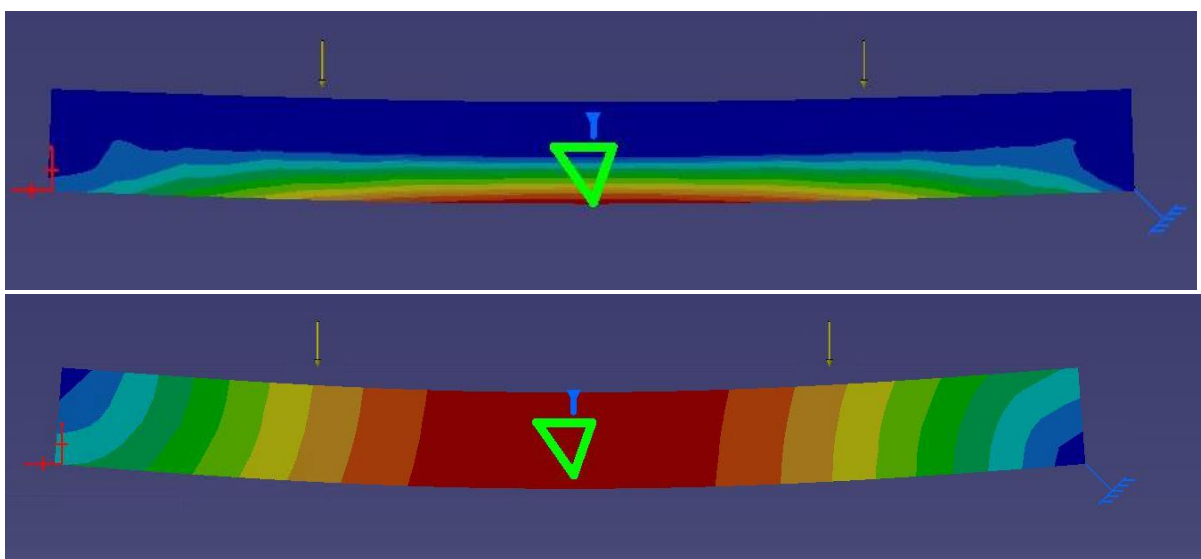


Abbildung 3.36 – Beispielhafte Ergebnisse der Simulation der Querträger

Die anderen Ergebnisse dieser Simulation zeigen eine ähnliche Biegeverformung und werden daher nur in ihren Ergebniswerten in Tabelle 3.10 gezeigt.

Die Ergebniswerte werden an den Extremstellen der auftretenden Kräfte sowie vertikalen Verformungen gemessen. Aufgrund der reinen Biegebelastung haben alle Querträgern ihre jeweiligen Extremwerte mittig. Daher werden die vertikalen Translationen sowie die maximalen Spannungswerte an diesen Stellen gemessen. Die Ergebnisse dieser Simulation sind in Tabelle 3.10 zu sehen. Die verschiedenen Querträger wurden mit einem FE-Netz mit Knotenabstand 5 mm simuliert. Der global zulässige Fehlergrad wurde auf max. 5% beschränkt, damit die Ergebnisse keine zu großen Abweichungen zulassen.

Tabelle 3.10 – Ergebnisse der Simulation der Querträger

Wert	Hexagonstruktur mit Mittelplatte	Holzbalken	Holz-Doppel-T-Träger	Aluminium-Doppel-T-Träger
Vertikale Verschiebung	8,51 mm	15,7 mm	11,2 mm	3,46 mm
max. Spannung mittig	37,4 MPa	40,0 MPa	27,3 MPa	83,5 MPa

3.4.3 Vergleichende Bewertung der Hexagonstruktur mit Mittelplatte zu den Querbalken
Der Holzbalken hat im Vergleich zu der Hexagonstruktur mit Mittelplatte in allen Bereichen schlechter abgeschnitten und wird daher auch nicht weiter betrachtet.

Der Holz-Doppel-T-Träger hat in der maximalen Spannung mittig einen geringeren Wert erzielt als die Hexagonstruktur mit Mittelplatte. Die vertikale Translation des Holz-Doppel-T-Trägers ist dafür höher. Daraus folgt, dass der Holz-Doppel-T-Träger eine geringere Materialbelastung hat, dies aber durch eine höhere Formänderung ausgleicht. Die Formänderung wurde im Lastenheft vorab als maximale Durchbiegung von 25 mm festgelegt, da dies der Normwert für die Durchbiegung von Europaletten entspricht (siehe Anhang A1). Eine höhere Formänderung der Bodenstruktur kann jedoch aufgrund der eingebauten Batterie problematisch werden. Daher sollte diese so gering wie möglich ausfallen. Der Holz-Doppel-T-Träger erfüllt die vorab definierten Anforderungen aus dem Lastenheft, wodurch ein Einsatz dieses Querträgers theoretisch auch möglich wäre.

Der Aluminium Doppel-T-Träger hat in der maximalen mittigen Spannung den höchsten Wert erzielt. Dies lässt sich mit dem höheren E-Modul von Aluminiumlegierungen erklären. Dafür ist die vertikale Translation in diesem Träger mit Abstand am geringsten. Die maximale Bruchspannung von Aluminium gegenüber Biegungen ist stark abhängig von der jeweilig benutzten Aluminiumlegierung. Hier können je nach Legierung Spannungen von 190 MPa bis zu 700 MPa ausgehalten werden [15]. Selbst bei Verwendung einer Legierung mit geringer Bruchspannung wird diese nicht überschritten.

Durch die höhere Biegesteifigkeit ist die Verformung deutlich geringer als bei den anderen Querbalken.

Ein allgemeines Problem der hohen Doppel-T-Träger stellt sich jedoch durch die Gefahr eines lokalen Knickens des Stegs ein. Zusätzlich kann aufgrund der Form der Doppel-T-Träger gegenüber der Hexagonstruktur mit Mittelplatte mit einer geringeren Torsionssteifigkeit gerechnet werden. Bei zu hoher Belastung könnte dies in einem möglichen Versagen durch Knicken resultieren.

Die Querträger werden in einer Bodenstruktur weiter eingespannt, wodurch die möglichen Knickfälle verhindert werden können. Dies wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt und sollte in einer fortführenden Arbeit beachtet werden.

Als Fazit der Simulation der Querträger kommen in unserem Fall nur noch die Hexagonstruktur mit Mittelplatte und der Doppel-T-Träger aus Holz in Frage. Hier muss im speziellen Fall abgewogen werden, welche Werte für die Bodenstruktur wichtiger sind. Die geringere Durchbiegung und damit höhere Biegesteifigkeit sowie die höhere Torsionssteifigkeit der Hexagonstruktur mit Mittelplatte bieten eine bessere Grundlage für weitere Bodenkonzepte. Dadurch können in anderen Bauteilen (Wände, etc.) mit einem steiferen Boden gerechnet werden, wodurch diese Auslegung einfacher zu realisieren wird.

Die Spannungen bleiben dabei auch mit der Biegebelastung unter den in Kapitel 3.2.1 maximal zulässigen Spannungen für den Werkstoff Buchenholz.

3.5 Anbindungsmöglichkeiten des Kerns

3.5.1 Grundbedingungen

Für die Anbindungsmöglichkeiten des Kerns an die Decklage bzw. den Boden müssen die Vereinfachungen aus Kapitel 3.1.2 beachtet werden. Die Decklage sowie auch der Boden sollen austauschbar konstruiert werden. Durch diese Vereinfachung können nichtlösbaren Verbindungen zwischen Decklage und Kern sowie zwischen Boden und Kern nicht umgesetzt werden.

Da die Hauptlasten über den Kern getragen werden, reicht es die Decklage und den Boden soweit zu fixieren, dass diese sich nicht verschieben können beim Transport. Zudem müssen sie die Druckkräfte auf die Hexagonstruktur mit Mittelplatte übertragen können.

Der Boden muss zudem dick genug sein, um ein Durchstoßen verhindern zu können (siehe Anhang A1). Außerdem muss der Boden das Gewicht der Batterie tragen können sowie den Boden vor korrosiven Medien schützen können.

Die Decklage muss einfach abnehmbar konstruiert sein. Da die Decklage durch die häufigen Be- und Entladevorgänge beschädigt werden kann, sollten einfache Platten für die Decklage verwendet werden.

3.5.2 Konzeptfindung

Damit der Boden vor korrosiven Medien geschützt ist, muss hier ein Material eingesetzt werden, welches keine Feuchtigkeit aufnehmen kann. Zudem sollte das Material bei Steinschlag nicht direkt

diese Eigenschaft wieder verlieren können. Dadurch scheiden alle Materialien aus, welche diese Eigenschaft nur über eine Lackierung als Schutz gewinnen. Dies betrifft unter anderem alle Holzarten. Obwohl die Bodenstruktur ein „grünes“ Projekt werden soll, empfiehlt es sich an dieser Stelle ein dünnes Kunststoffcover zu verwenden, da dies die einfachste und kostengünstigste Lösung darstellt. Die Bodenstruktur soll so „grün“ wie möglich werden. Daher wird das Kunststoffcover gerade so dick konstruiert, dass es korrosive Medien abhalten kann und nicht direkt durch Steinschlag oder ähnlichem durchlässig wird. Dadurch muss das Kunststoffcover von innen weiter verstärkt werden durch strukturelle Holzplatten. Als Alternative zu den klassischen Kunststoffen können sogenannte „bioabbaubare Polymere“ verwendet werden, welche den Vorteil eines Recyclens/ eines Abbaus der Polymere nach Verschrottung ermöglichen. [14]

Da das Konzept insgesamt aus einfachen Platten aufgebaut werden sollte und die Hexagonstruktur mit Mittelplatte symmetrisch aufgebaut ist, werden für Boden und Decklage dieselben Bauteile benutzt. Damit bei einer lokalen Beschädigung nicht der gesamte Boden bzw. die gesamte Decklage ausgetauscht werden muss, werden die Platten aus mehreren kleineren Platten zusammengesetzt. Dies bietet zudem die Möglichkeit einer einzelnen Installation der Platten, wodurch spezielle Anforderungen leichter umsetzbar sind. Diese Platten könnten z.B. aus Multiplex oder Sperrholz als Grundlage aufgebaut sein.

Für eine sichere Verankerung der Platten bieten sich die schrägen Flanken der Hexagonstruktur für eine Anbindung an. Durch einfache dreieckige Querbalken unter den Platten können diese an die Flanken angelegt werden und so ein Verrutschen in Längsrichtung der Bodenstruktur verhindert werden. Die Keile können direkt auf die Platte aufgeklebt werden. Abbildung 3.37 zeigt einen ersten Entwurf einer solchen Platte.



Abbildung 3.37 – Erstes Konzept einer Platte

Durch diese dreieckige Anbindung können die Kräfte über die Seitenflanken abgeleitet werden. Die Verrundung am Ende der Dreiecksformen bewirkt, dass die Kräfte nicht punktuell übertragen werden können, falls sich die Platten mittig durchbiegen.

Eine reine Auflage reicht nicht, damit die Platten in allen Richtungen fest mit der Hexagonstruktur verankert sind. Damit die Platten weiterhin lösbar von dem Kern montiert werden, kommen an dieser Stelle punktuelle Füge Techniken zum Einsatz. Hierbei können wie in Abbildung 3.38 zu sehen Bolzen, Schrauben oder ähnliches durch die Platte an die Flanken der Hexagonstruktur angebracht werden. Da

die Belastungen in Längsrichtungen durch die mechanische Konstruktion blockiert ist, werden diese punktuellen Fügestellen nicht zu stark belastet, wodurch ein Aufreißen der Flanken der Hexagonstruktur nur schwierig möglich ist.

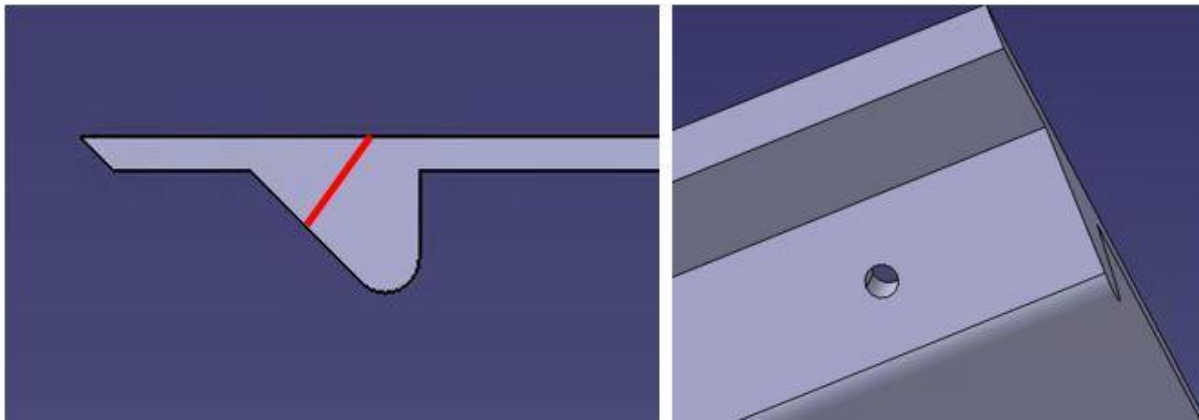


Abbildung 3.38 – Verankerung beispielhaft dargestellt

Zusätzlich reduziert die Auflagefläche der Dreiecksquerbalken auf die Flanke der Hexagonstruktur eine Verformung durch eine Druckbelastung, wodurch der Kern an Steifigkeit gewinnt.

Diese Plattenkonstruktion kann für die Decklage, sowie auch für den Boden verwendet werden. Dies ist Beispielhaft in Abbildung 3.39 zu sehen. Hier wird eine solche Platte zwischen zwei Hexagonstrukturen dargestellt.



Abbildung 3.39 – Beispielhafter Aufbau der Bodenstruktur

Zusätzlich zu den Platten soll am Boden ein dünnes Kunststoffcover angebracht werden. Damit das Kunststoffcover die komplette Bodenstruktur vor Umwelteinflüsse, wie stehendes Wasser oder korrosiven Medien schützen kann, muss das Kunststoffcover einen Überstand an den Seiten haben. Daher wird es als Wanne konstruiert. Zur Befestigung werden Anschraubpunkte oberhalb der Bodenstruktur zu befestigen, um einen kompletten Schutz der Holzbauteile zu gewährleisten. Die Anbindungspunkte der Wanne sind in Abbildung 3.40 gezeigt. Die Anbindungspunkte an die Bodenstruktur können erst in einem späteren Schritt des Projektes U-Shift realisiert werden, da hierfür auch die Anbindung der Kapsel an das Driveboard relevant ist. Da die Anbindung der Kapsel an das

Driveboard in dieser Arbeit nicht gezeigt wird, kann die Anbindung der Wanne an die Bodenstruktur auch nicht gezeigt werden.

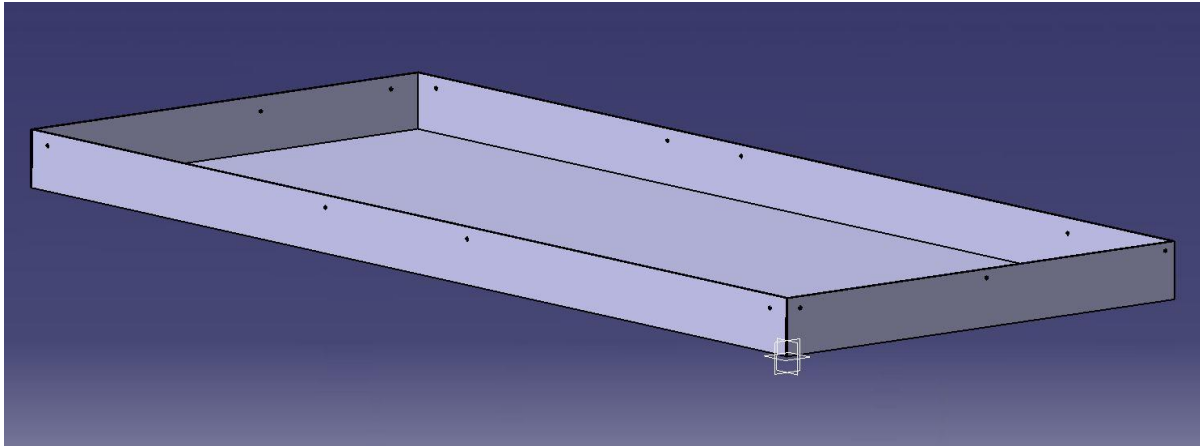


Abbildung 3.40 – Beispielhafter Aufbau des Kunststoffcover

3.5.3 Bewertung des Konzeptes

Das Bodenkonzept wie in Abbildung 3.39 dargestellt zeigt eine Variante auf, wie die Hexagonstruktur mit Mittelplatte in eine Bodenstruktur integriert werden kann. Das Konzept erfüllt die aufgestellten Grundbedingungen.

Decklage und Boden lassen sich von dem Kern trennen. Zusätzlich liefert ein modularer Aufbau eine flexible Bodenstruktur, wodurch mögliche Änderungen der Anforderungen sowie spezielle Modifikationen in der Bodenstruktur umgesetzt werden können. Zum Beispiel können für die Batterie die Decklagenabschnitte Einzel entnommen werden, wodurch die Wartung der Batterie vereinfacht wird. Des Weiteren bietet der einfache Aufbau der Platten Raum für mögliche Anbindungspunkte zu den bisher als Blackboxen geplanten Einbauten (Batterie, etc.), die bisher noch nicht festgelegt wurden.

Durch die flächige Auflage der Platten sowie das mechanische Blockieren von Drehungen durch die dreieckige Anbindung verstärkt das Konzept die Flanken der Hexagonstruktur. Die Grundidee der Hexagonstruktur mit Mittelplatte die Druckbelastung in eine Zugbelastung umzusetzen wird durch dieses Konzept weiter unterstützt, da keine direkte Verbindung zwischen Decklage und Boden gegeben ist. Dadurch müssen alle Belastungen über den Kern abgeleitet werden.

Eine nicht ausgeführte Frage in diesem Konzept sind die Abschlüsse des Bodenkonzepts sowie die Anbindung über die C-Schienen an das Driveboard. Zusätzlich muss die vorgestellte Lösung für das Cover um die Bodenstruktur noch weiterentwickelt werden, vor allem in Kombination mit den strukturellen Platten als Verstärkung. Dies resultiert in weiteren Herausforderungen, beispielsweise der Einbaureihenfolge sowie auch der Anbindungspunkte über das Cover.

Eine Simulation und Validierung des gesamten Bodenkzeptes wurden in dieser Arbeit nicht umgesetzt. Diese sollten zusammen mit den oben genannten ausstehenden Aufgaben in fortführenden Arbeiten umgesetzt werden.

4. Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde ein Konzept für eine holzbasierte Bodenstruktur in einer Güterkapsel für das Fahrzeugkonzept U-Shift entwickelt. Der Fokus dieser Arbeit, ein innovatives und „grünes“ Konzept zu entwickeln, wurde mit der entwickelten Hexagonstruktur mit Mittelplatte erfüllt. Die Hexagonstruktur mit Mittelplatte ist komplett aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz konstruiert.

Zudem wurde ein Lastenheft für die Bodenstruktur erstellt, welches für das Fahrzeugkonzept U-Shift im Gesamtkonzept wichtige Daten über diese Arbeit hinaus zusammenfasst.

Durch vereinfachte Simulationen ohne Sperrlagen, welche später mit einer genauen Simulation mit Sperrlagen überprüft wurde, konnte ein Sicherheitsfaktor von 1,3 bei den zulässigen Spannungen ermittelt werden, welcher bei Furnierschichthölzer die Vereinfachung ermöglicht, Sperrlagen im ersten Schritt zu vernachlässigen. Dadurch müssen Furnierschichthölzer speziell in einer ersten Auslegung nicht aufwändig simuliert werden, sondern können vereinfacht als homogenes, orthotropes Bauteil aufgebaut werden unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 1,3.

Die Hexagonstruktur mit Mittelplatte selbst kann vielseitig eingesetzt werden und wurde in der Arbeit auch auf verschiedene Anwendungen verglichen und geprüft. Der einfache Aufbau der Struktur aus zwei Hutprofilen und einer Mittelplatte ermöglicht zugleich auch eine große Variation von Bauteilen ohne eine neue Form herstellen zu müssen. Zugleich wurden verschiedene Probleme bei der Herstellung der Profile aus Holzfurnieren identifiziert und Lösungen hierfür gefunden.

Es wurden mögliche gängige Querträger in einem direkten Vergleich zu der Hexagonstruktur mit Mittelplatte simuliert und analysiert. Dadurch wurden die Vorteile sowie auch die Nachteile der Hexagonstruktur mit Mittelplatte gegenüber den Vergleichs-Querträger aufgezeigt. Im Gesamtkonzept der Bodenstruktur erfüllt dabei die ausgelegte Hexagonstruktur mit Mittelplatte die geforderten Bedingungen.

Zuletzt wurde ein Konzept für die Bodenstruktur entworfen, welche speziell die Hexagonstruktur mit Mittelplatte in das Konzept einbindet. Dieses Konzept ist aus mehreren identischen Bauteilen aufgebaut und kann daher auch modular erweitert werden. Damit können unterschiedliche Größen und Varianten an Bodenstrukturen realisiert werden. Den Anforderungen des Lastenheftes, einen Zugang zur Batterie zu ermöglichen, wurde beim betrachteten Vorschlag eines Bodenkonzpts gewährleistet.

Da sich das Fahrzeugkonzept U-Shift noch in einer Startphase befindet, können dadurch verschiedene Varianten abgedeckt werden und somit ein breites Einsatzspektrum abgedeckt werden.

5. Diskussion und Ausblick

Das Hexagonkonzept kann weiter optimiert werden. Das komplette Leichtbaupotential ist noch nicht ausgeschöpft. Die Orientierungen der einzelnen Furnierlagen sollten im Speziellen noch betrachtet werden.

Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Kern der Bodenstruktur lag, muss das Gesamtkonzept aus Kapitel 3.5 noch simuliert, geprüft, optimiert und validiert werden. Zudem können hier die modularen Aspekte der Bodenstruktur weiterentwickelt werden.

Noch offene Fragen sind unter anderem die direkte Anbindung der Bodenstruktur zunächst an weitere Bauteile der Kapsel. Spezielle Bauteile wie z.B. die C-Schienen zur Aufnahme vom Driveboard sowie andere „Nice-to-have“-Vorgaben, sollten noch weiter in das Konzept eingearbeitet werden. Seitenwände und die Aufbauten sowie auch modulare Aufbauten oder auch feste Kühlcontainer wurden bisher nicht betrachtet.

Die direkte Anbindung an das Driveboard fehlt noch. Hier fehlten die genauen Angaben über Anbindungspunkte, da diese in der frühen Phase des Projektes U-Shift noch nicht feststanden. Die Integration zur umgebenden Struktur muss in diesem Schritt mit ausgelegt werden.

In dieser Arbeit wurden bewusst bestimmte Bereiche als Blackboxen ausgeblendet (Batteriefach, Crashzonen, etc.), da sie den Umfang dieser Arbeit überschritten hätten. Diese Blackboxen sollten in weiteren Arbeiten mit einbezogen werden. Speziell die Anbindungspunkte der Blackboxen sowie die Schnittstellen zur Bodenstruktur müssen hier noch definiert werden. Sich daraus ergebende zusätzliche Anforderungen an die Bodenstruktur müssen hier noch definiert sowie Detailkonstruktionen erarbeitet werden.

Mit dieser Arbeit wurde ein erstes Konzept für eine holzbasierte Bodenstruktur aufgezeigt. Dadurch schafft diese Arbeit Grundlagen für weitere Arbeiten zum Thema „holzbasierte Bodenstruktur“ im Fahrzeugkonzept U-Shift.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Götz, Konrad. *Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde-eine lokale Approximation*. Forschungszentrum Karlsruhe, 2000.
- [2] Kappel, Roland. *Zugseile in der Natur*. Vol. 7313. FZKA, 2007.
- [3] Niemz, Peter. "Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe." (2016).
- [4] Wolf-Christian Hertrampf, Recherche zu Nutzungsmöglichkeiten von Holzwerkstoffen in der Fahrzeugstruktur, Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., 2009.
- [5] Handbook, Wood. "Wood Handbook-Wood as an engineering material." *US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA. Gen. Tech. Rep. FPLGTR-113* (1999).
- [6] Dietz, Hans. "Ausbeute durch CNC-Bearbeitung im Sägewerk." *Intelligent produzieren*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 56-67.
- [7] Ponal, Ponal Classic Technisches Merkblatt, Ausgabe 15.03.2017
- [8] <https://www.urbanaccessregulations.eu/> Zugriff am 27.11.2020
- [9] <https://www.c40.org/> Zugriff am 27.11.2020
- [10] Clasen, C., and T. Knoke. *Die finanziellen Auswirkungen überhöhter Wildbestände in Deutschland*. Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung, 2013.
- [11] Kreck, Alexander, et al. "Elektroauto gleich" Nullemissionsauto"?-Eine Bewertung des CO₂-Ausstoßes von Elektrofahrzeugen unter realen Bedingungen."
- [12] Both, Roland. "Furniere und Plattenwerkstoffe." *Prüfungsfragen und Antworten für Tischler*. Vieweg+ Teubner Verlag, 2001. 47-63.
- [13] Xiao, Yanping, Markus A. Reuter, and U. D. O. Boin. "Aluminium recycling and environmental issues of salt slag treatment." *Journal of Environmental Science and Health* 40.10 (2005): 1861-1875.
- [14] Haider, Tobias P., et al. "Kunststoffe der Zukunft? Der Einfluss von bioabbaubaren Polymeren auf Umwelt und Gesellschaft." *Angewandte Chemie* 131.1 (2019): 50-63.
- [15] Friedrich Ostermann: *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2014, 3. Auflage, S. 86–87.

7. Anhang A1

Themenfeld	Bemerkungen	Werte	Priorität Rudlaff
Technische Daten - Dimensionierung			
Maße außen	Aktuell fix u. U. mehr Platz nötig min: 4 Europaletten quer (4x 800 x 1200) = 3200mm x 1200mm	3350mm x 1340 mm	Prio 1
Maße innen	besser: 4 Eurogitterboxen quer (4x 835 x 1240) = 3340mm x 1240mm + Rangierabstand (> 2x 10mm)	3270 mm x 1280 mm	Prio 1
Höhe doppelter Boden	Bauraum Vorsehen für Batterien	100 mm	Prio 1
Max. Wandstärke	Kühlvariante (Isolierte Wände)	je 30 mm	Prio 1
Technische Daten - Gewichte			
Gesamtgewicht Driveboard + Kapsel	Sollgewicht < 7250 kg	< 7250 kg	Prio 2
Eigengewicht Driveboard	Gewicht ca. 1800 kg	1800 kg	Prio 2
Eigengewicht Cargo-Kapsel ohne Batterie	noch unbekannt (< 1 to gewünscht bei schwerster Kühlvariante)	< 1000 kg	Prio 1
Zuladung Cargo-Kapsel	Europalette: 4x(1500+20)=8080 kg ist zu viel! Min. 1to besser 1,25 to	1250 kg	Prio 1
Gewicht Batteriepacks	Als Blackbox	300 kg und 120l	Prio 1
Randbedingungen			
Anbindung zum Driveboard	U-Schienen mit 2 stehende Pins vorne und vll. 2 liegende Pins hinten	2420 mm Länge U-Schiene Lasteinleitung in den Boden großflächig	Prio 2
Ladungssicherung			
Positionierungskonzept	Europaletten/ Gitterboxen (am größten!)/ Kleincontainer/ Bäckerkisten	nur wichtig für Innenmaße	Prio 2
Seitenwand	Verzuren von hohen Gütern als Kipperschutz	Nur Wechselwirkung beachten	Prio 2
Mechanische Anforderungen			
Biegefestigkeit lokal unterer Boden	Beladung Batteriegewicht plus 3G-Senke nur Durchhang quer beachten, da längs U-Schienen stützen	linear-elastischer Bereich	Prio 1
Biegefestigkeit global	--> Durchbiegung mittig max. 25mm aus Regallagerungen mit	< 25 mm	Prio 1
Torsionssteifigkeit	Vergleichbar mit Driveboard? Noch ein Forschungspunkt	aktuell keine Aussage möglich	Prio 2
Lokale Bodenlast	Palette/ Hubwagen/ Palettstacker	keine plastische Verformung	Prio 1
Lasteinleitung zur Ladungssicherung	Auf vorhandene Standardlösungen zurückgreifen C-Schiene / Punkt	keine plastische Verformung	Prio 1
Lasteinleitung zum Driveboard	Großflächig aufgrund der U-Schienen	Auswirkung auf Bodenkonzept	Prio 1
„Crash“ hinten	Freier Raum ab Höhe Hinterachse bis Schluss Aufprallträger bei den Kapseln analog zu heutigen Fahrzeug --> Starre Anbindung beachten, tragende Struktur	Vorne bis Mittelpunkt Hinterachse 1970 mm	Prio 2
Miss-Use			
Be- & Entladung	15 cm Kantenschutz in einer Variante mit betrachten		Prio 1
Steinschlag/ Durchdringen	Mindestdicke „Boden“		Prio 1
Entflammen			Prio 2
Schrammleiste außen	An Driveboard --> nicht für Bodenkonzept relevant		Prio 1
Umwelteinflüsse			
Nässe	Kein nacktes Holz außen! „wasserdicht“		Prio 1
Temperatur	Batterie ausschlaggebend --> Bauraum für Blackbox „Kühlung“ vorsehen		Prio 2
Funktionsintegration/ „Nice-to-have“			
Thermische Isolation			Prio 2
Zugang	Konzept erarbeiten		Prio 1
Modularisierung Anzahl Packs	Bauraum für Blackbox „Batterie“ vorsehen		Prio 2
Batterie thermal Runaway	Für BA nicht relevant/ für Gesamtkonzept relevant		Prio 2
Aufnahme Sensorik	Freier Raum hinten		Prio 2
Rollboden			Prio 2
Modularisierung? (Varianten U-Shift)	Konzept aus Gleichteilen aufbaubar?		Prio 2
Skalierung?	Konzept skalierbar?		Prio 2
Containertransport	Für BA nicht relevant/ für Gesamtkonzept relevant		Prio 2

Auszug aus dem Lastenheft

8. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit räume ich, (Rudlaff, Moritz, 3237456, Josef-Waibel-Weg 7, 70469 Stuttgart) der Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau, ein kostenloses, zeitlich und räumlich unbeschränktes, einfaches Nutzungsrecht an der von mir erstellten Bachelorarbeit mit dem Titel

„Holzbasierte Bodenstruktur für eine Güterkapsel für das Fahrzeugkonzept U-Shift“

und den im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Arbeitsergebnissen ein. Ich erkläre, die Arbeit selbständig verfasst und bei der Erstellung dieser Arbeit die einschlägigen Bestimmungen, insbesondere zum Urheberrechtsschutz fremder Beiträge, eingehalten zu haben. Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z.B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen) enthält, erkläre ich, dass diese Beiträge als solche gekennzeichnet sind (z.B. Zitat, Quellenangabe) und ich eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt habe. Für den Fall der Verletzung Rechte Dritter durch meine Arbeit, erkläre ich mich bereit, der Universität Stuttgart einen daraus entstehenden Schaden zu ersetzen bzw. die Universität Stuttgart auf deren Aufforderung von eventuellen Ansprüchen Dritter freizustellen.

Das der Universität Stuttgart hiermit eingeräumte Nutzungsrecht erstreckt sich auf sämtliche bekannte Nutzungsarten und umfasst neben dem Recht auf Nutzung der Arbeitsergebnisse in Forschung, Lehre und Studium, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung, das Recht zur Bearbeitung und Änderung inklusive Nutzung, Vervielfältigung und Verbreitung der dabei entstehenden Ergebnisse, sowie insbesondere das Recht der öffentlichen Zugänglichmachung im Internet sowie das Recht der Weiterübertragung auf einen Dritten ohne meine erneute Zustimmung.

Mir ist bekannt, dass die Einräumung des Nutzungsrechts der öffentlichen Zugänglichmachung auch beinhaltet, dass mein Name im Zusammenhang mit dem Titel der oben genannten Arbeit auf den Webseiten der Universität Stuttgart genannt werden kann. Mir ist auch bekannt, dass – sofern meine Arbeit selbst nicht im Internet zugänglich gemacht wird – die Einräumung des Nutzungsrechts der öffentlichen Zugänglichmachung auch umfasst, dass die Universität Stuttgart auf ihren Webseiten meinen Namen im Zusammenhang mit dem Titel der oben genannten Arbeit (z.B. in Listen über am Institut abgeschlossene studentische Arbeiten) nennen kann.

Außerdem übertrage ich der Universität Stuttgart das Eigentum an einem von mir der Bibliothek des Instituts für Flugzeugbau kostenlos zur Verfügung gestellten Exemplars meiner oben genannten Arbeit und räume der Universität Stuttgart auch für dieses Exemplar die oben genannten Nutzungsrechte ein.

(hinteres Deckblatt, wird nach Druck eingefügt)